



第3章 电子器件及其电路模型

之2 三极管与场效应管

本节主要讨论：

- 三极管原理、特性与电路模型
- 场效应管原理、特性与电路模型



3.2 晶体三极管

一、三极管的结构与工作原理

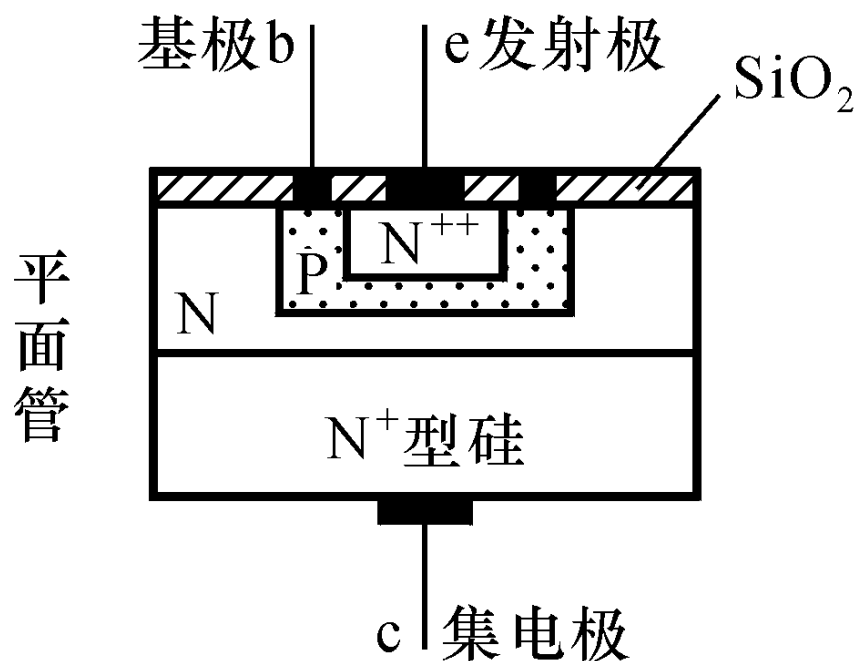
✧ 三极管也称为双极型三极管、双极型晶体管、晶体管、BJT（Bipolar Junction Transistor）。



✧ 三极管由2个背靠背的PN结组成，分为 **NPN**型、**PNP**型。

✧ 三极管又分为硅三极管、锗三极管。

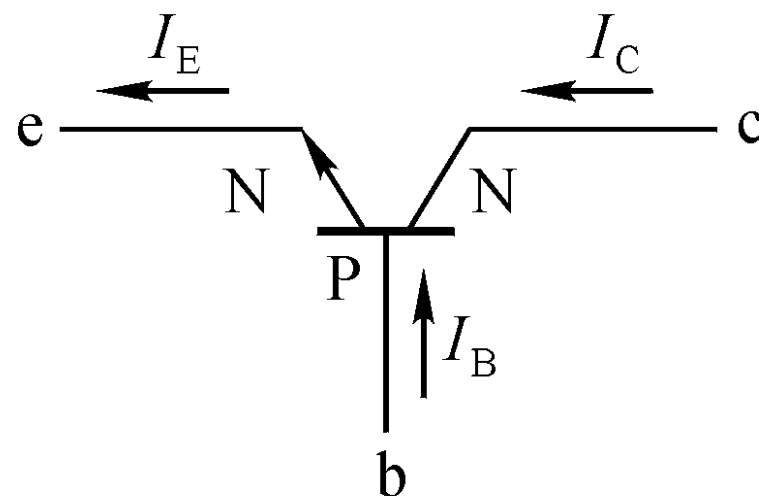
✧ NPN型三极管



c: Collector 集电极

b: base 基极

e: emitter 发射极

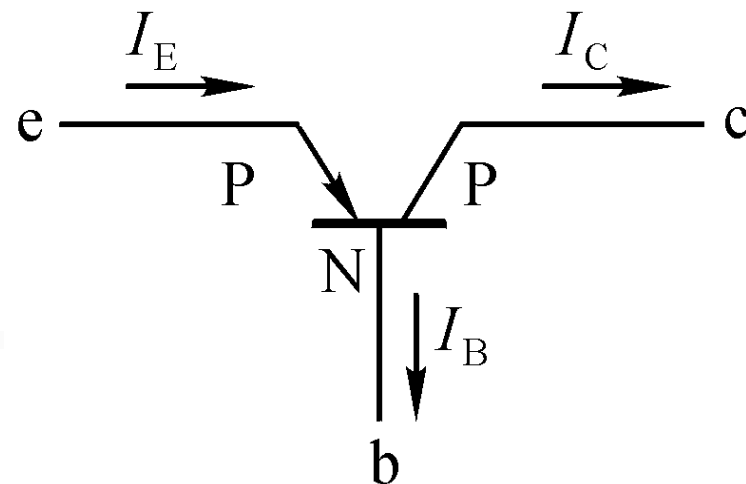
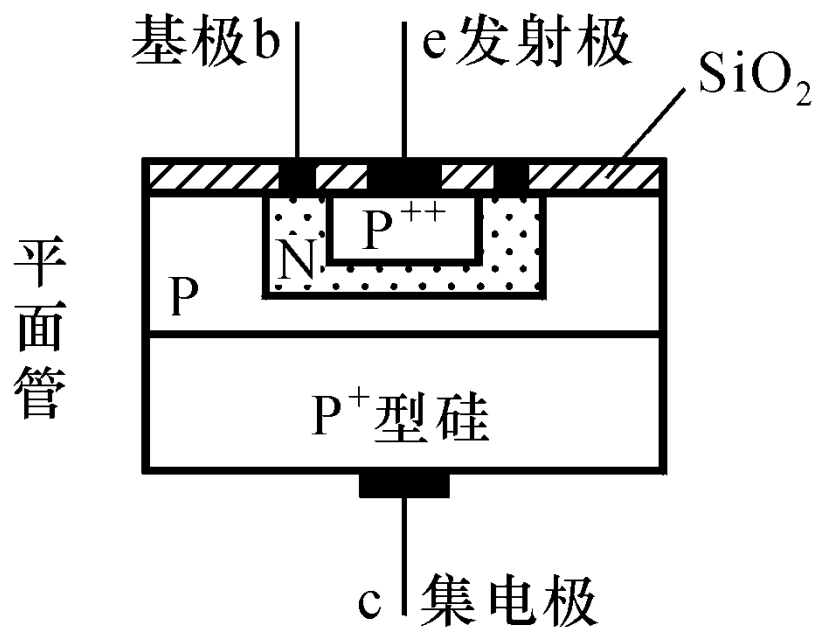


采用平面管制造工艺，在
 N^{+} 型底层上形成两个PN结。

工艺特点：**e区掺杂浓度高，
b区薄，c结面积大。**

箭头表示发射结正偏
时的实际电流方向。

✧ PNP型三极管



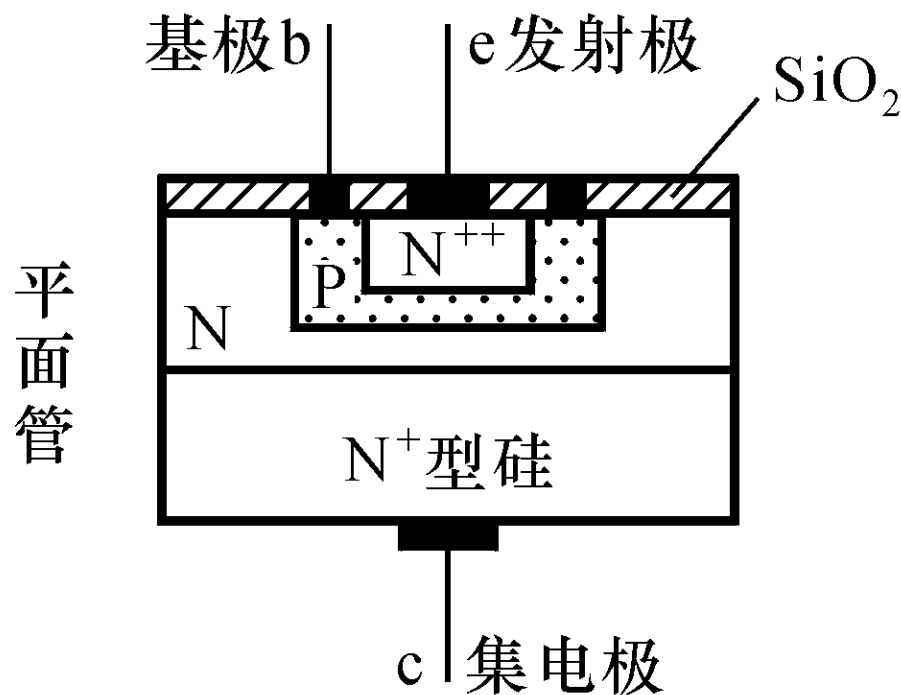
在 P^+ 型底层上形成两个PN结。

正常工作时，电流从b极流出。

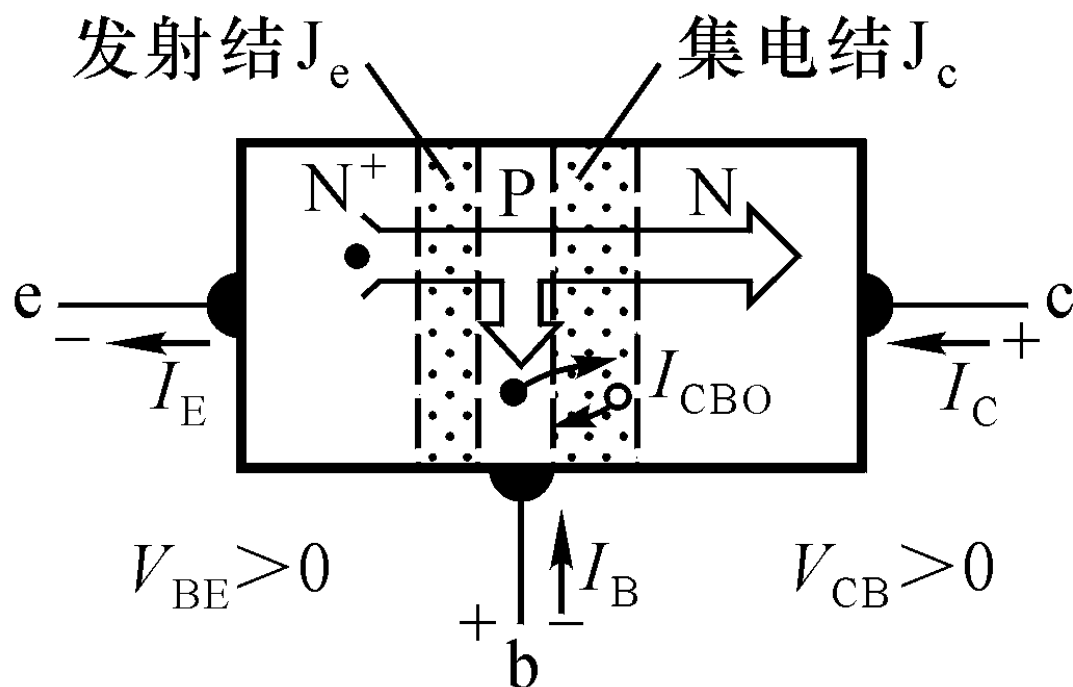
✧ 三极管内部结构特点

为了使三极管有电流放大作用，对三极管的器件结构有要求：

- **发射区**掺杂浓度远大于集电区，以尽可能多提供载流子；
- **基区**很薄，且掺杂浓度低，以减小载流子的复合机会；
- **集电区**结面积较大，以利于收集载流子。



✧ 载流子运动 (以NPN管为例)



条件 (放大状态) :

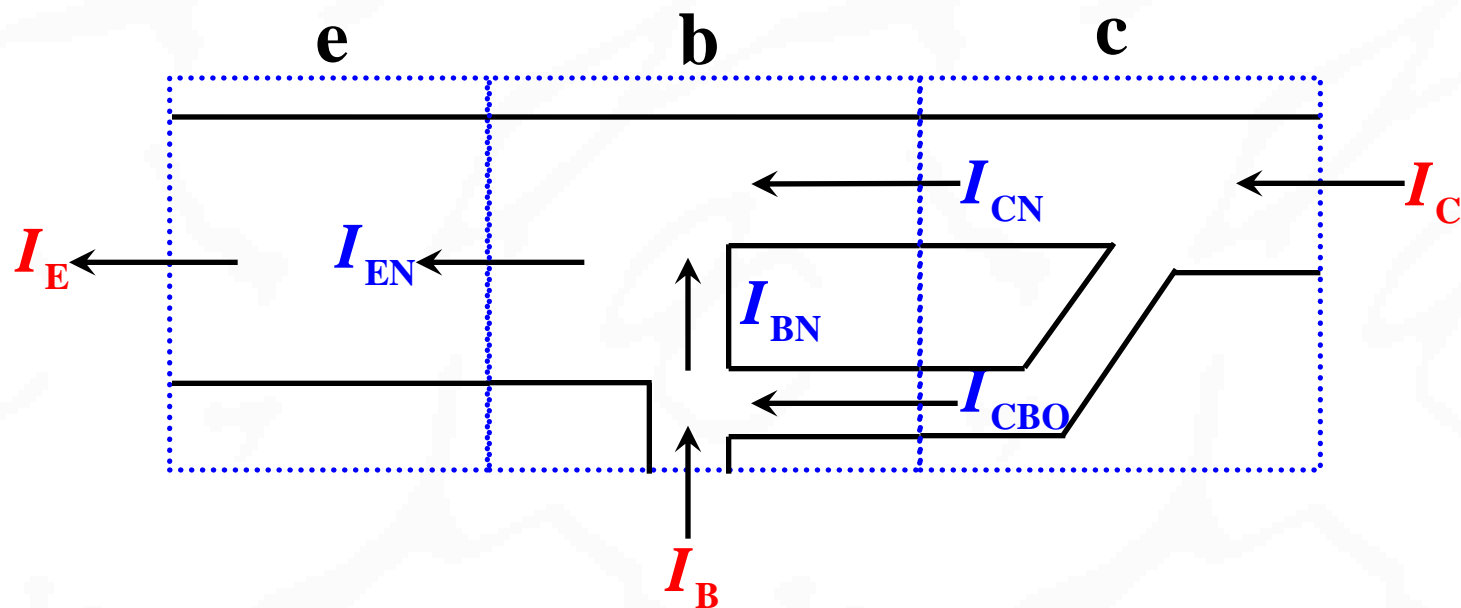
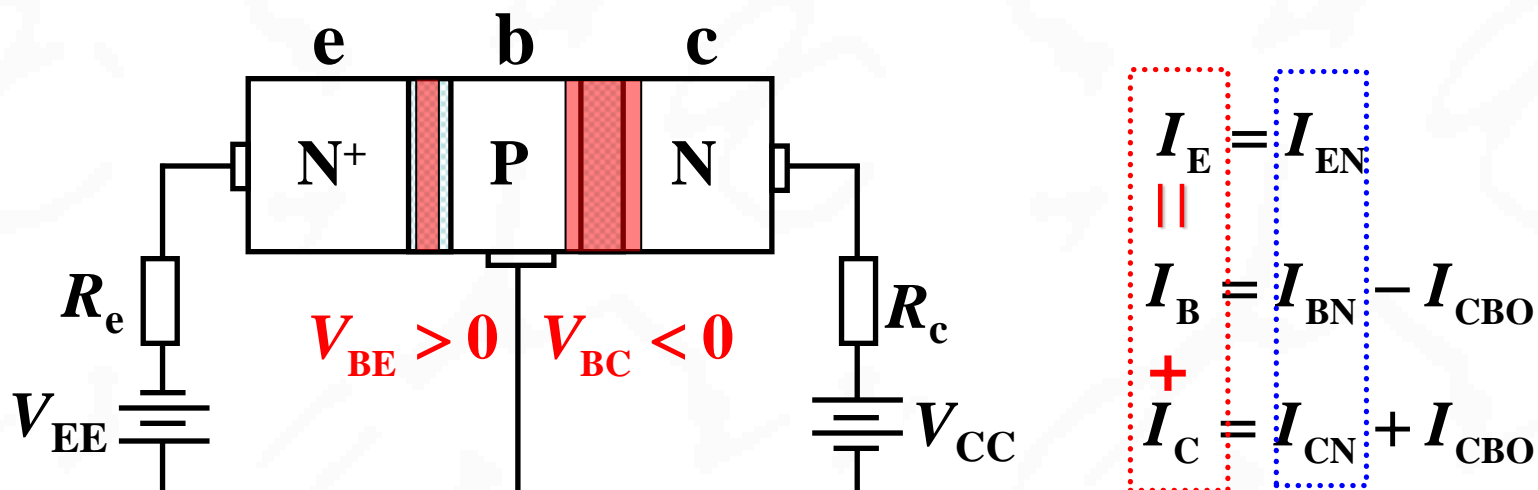
发射结正偏 ($V_{BE} > 0$)

集电结反偏 ($V_{CB} > 0$)

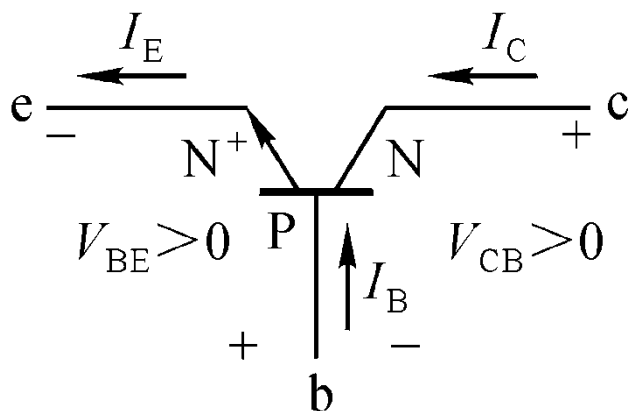
- 发射区向基区大量注入电子 (多子) ;
- 新注入的电子小部分被基区的多子 (空穴) 复合;
- 大部分注入的电子被拉入集电区。
- 集电结反偏, 少子形成反向饱和电流 I_{CBO} 。



☆ 三极管的电流关系



➤ 三极管的电流控制作用



$$I_E = I_{EN}$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO}$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

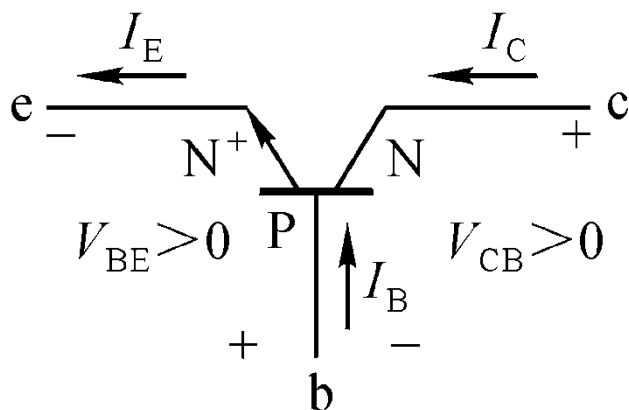
✧ I_{CBO} 称为**集电结反向饱和电流**，其值很小，常可忽略。

✧ 定义：
$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

$\bar{\beta}$ 称为**共射极直流电流放大系数**， $\bar{\beta} = 20 \sim 200$

✧ 定义：
$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_{EN}} \approx \frac{I_C}{I_E}$$

$\bar{\alpha}$ 称为**共基极直流电流放大系数**， $\bar{\alpha} = 0.95 \sim 0.995$



$$I_E = I_{EN}$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO}$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

$$\begin{aligned} I_C &= I_{CN} + I_{CBO} = \bar{\beta} I_{BN} + I_{CBO} = \bar{\beta} (I_B + I_{CBO}) + I_{CBO} \\ &= \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \end{aligned}$$

✧ I_{CEO} 称为 **穿透电流**，其值较小，也常可忽略。

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

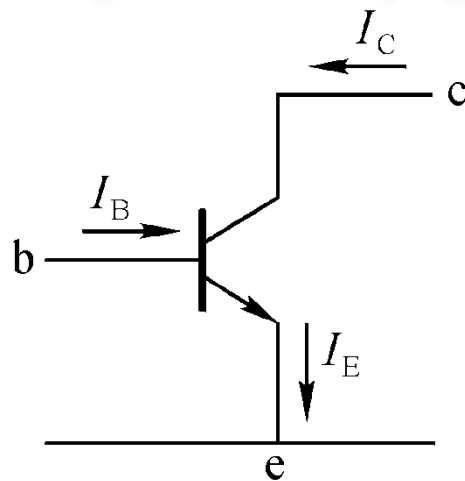
➤ 小结与讨论：三极管的电流放大与控制

$$\textcircled{1} \quad I_C \approx \bar{\beta} I_B$$

$$I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B \approx I_C$$

$$\textcircled{2} \quad I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$



- ✧ 无论是NPN管还是PNP管，输入电流对输出电流都具有控制作用，因此三极管是一种**电流控制**器件。
- ✧ 三极管不仅具有电流控制能力，并且还具有**电流放大**作用。
- ✧ 一定条件下（放大状态下），输入电流与输出电流成**线性**关系。

➤ 四种工作状态

- ✧ 发射结**正偏**，集电结**反偏**：**放大**工作状态
- ✧ 发射结**反偏**，集电结**反偏**：**截止**工作状态
- ✧ 发射结**正偏**，集电结**正偏**：**饱和**工作状态
- ✧ 发射结**反偏**，集电结**正偏**：**倒置**工作状态

在模拟电路中，三极管主要工作在放大状态；

在数字电路中，三极管主要工作在截止和饱和状态；

倒置工作状态应用较少。



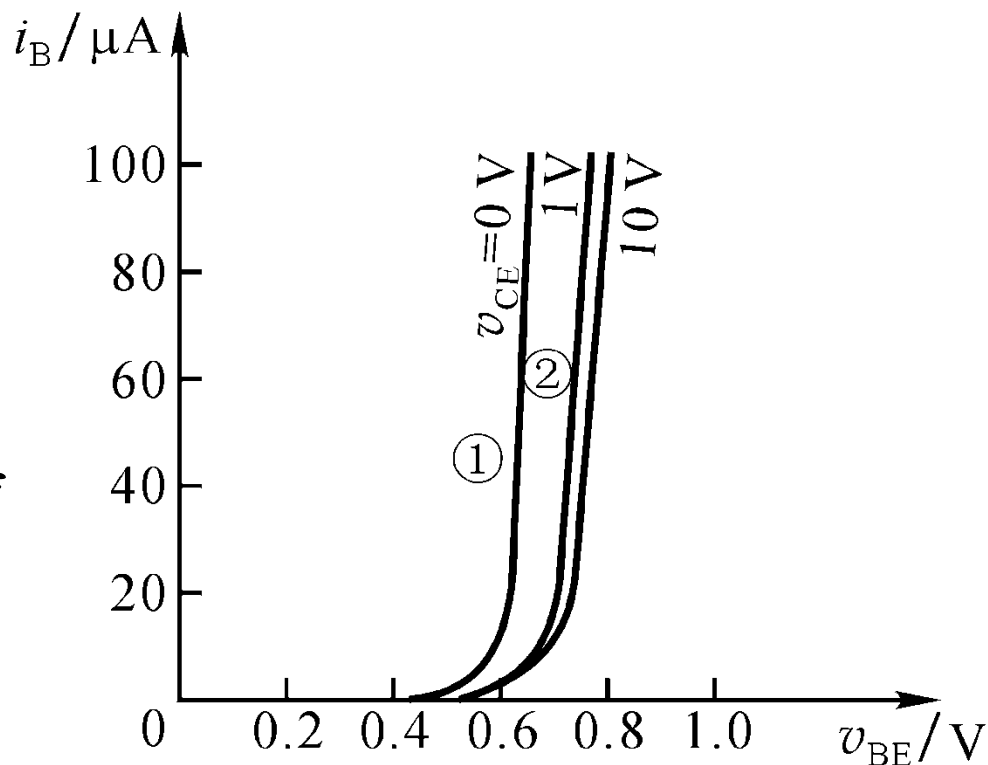
二、三极管的伏安特性及等效电路模型

1、共射极输入特性

基极电流 i_B 与发射结电压 v_{BE} 之间的关系

$$i_B = f(v_{BE})|_{v_{CE}=\text{const}}$$

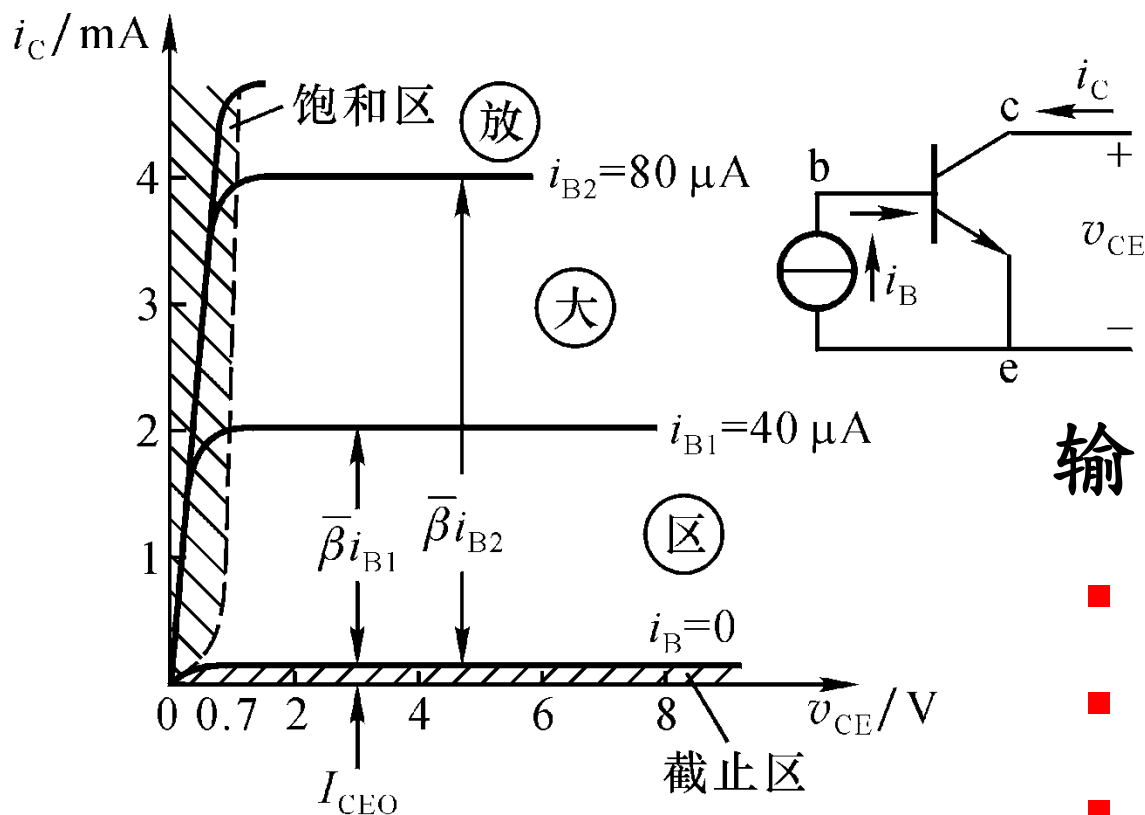
与PN结正向伏安特性曲线相似，当 $v_{CE} > 1$ 时，输入伏安特性基本不变。



2、共射极输出特性

集电极电流 i_C 与集-射间电压 v_{CE} 之间的关系

$$i_C = f(v_{CE})|_{i_B = \text{const}}$$



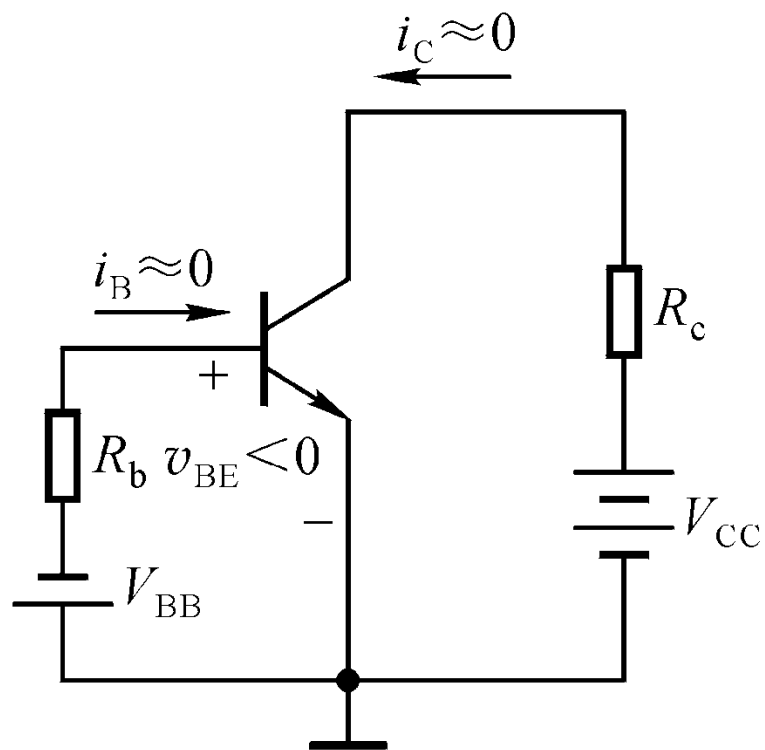
输出特性曲线族

- 截止区
- 饱和区
- 放大区

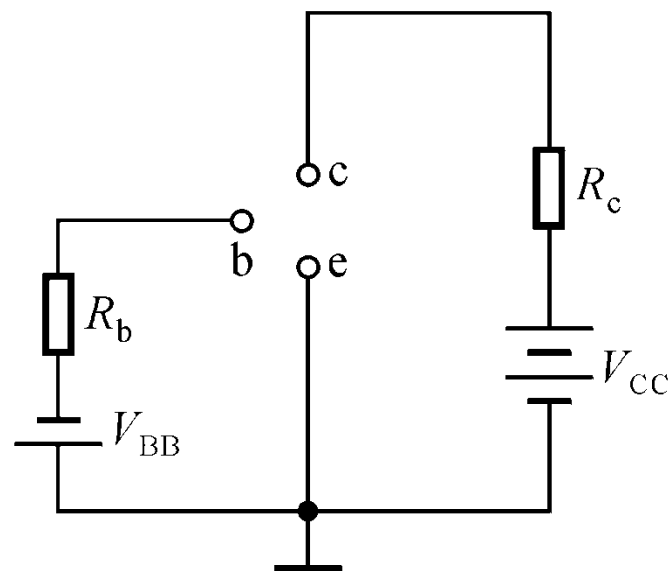
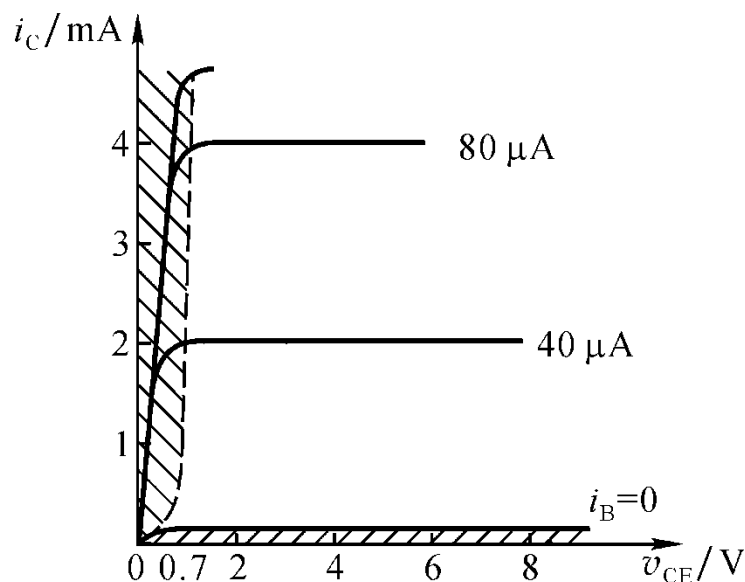
截止区

发射结反偏，集电结反偏

$v_{BE} < V_{th}$ 硅0.5V，锗0.1V



$i_B \approx 0, i_C \approx 0$



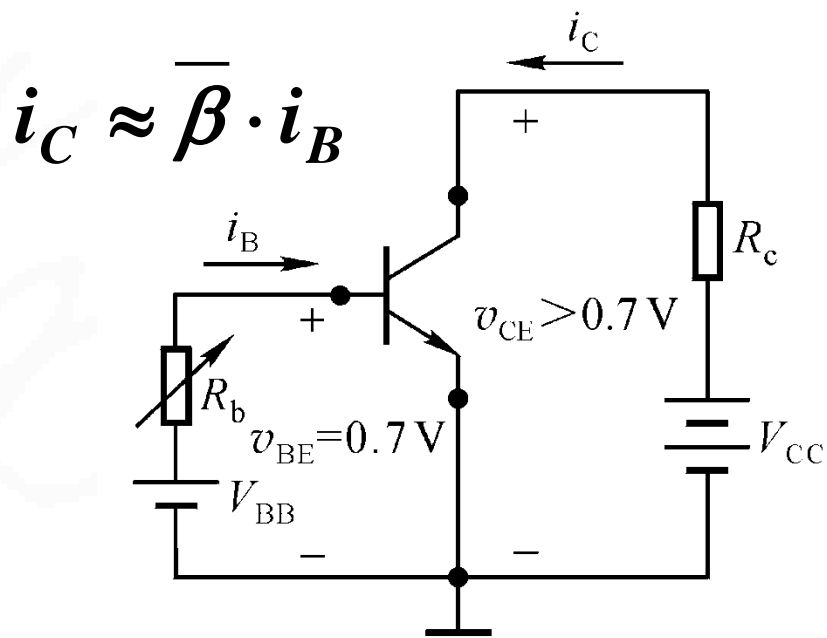
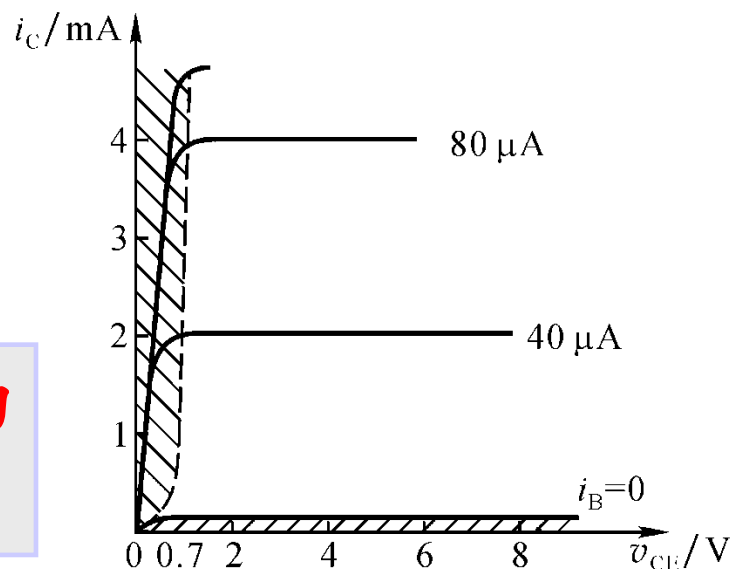
等效电路

☆ 放大区

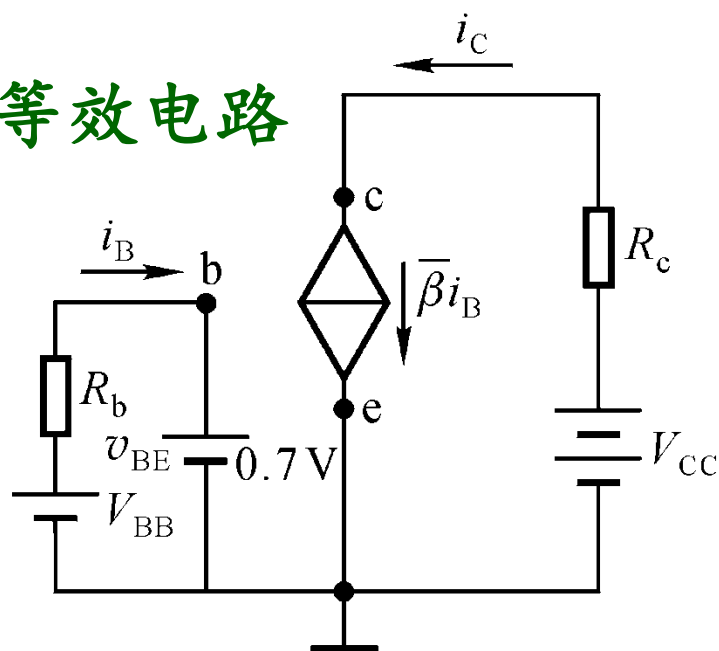
发射结正偏，集电结反偏

$$i_B > 0, v_{CE} > 0.7V$$

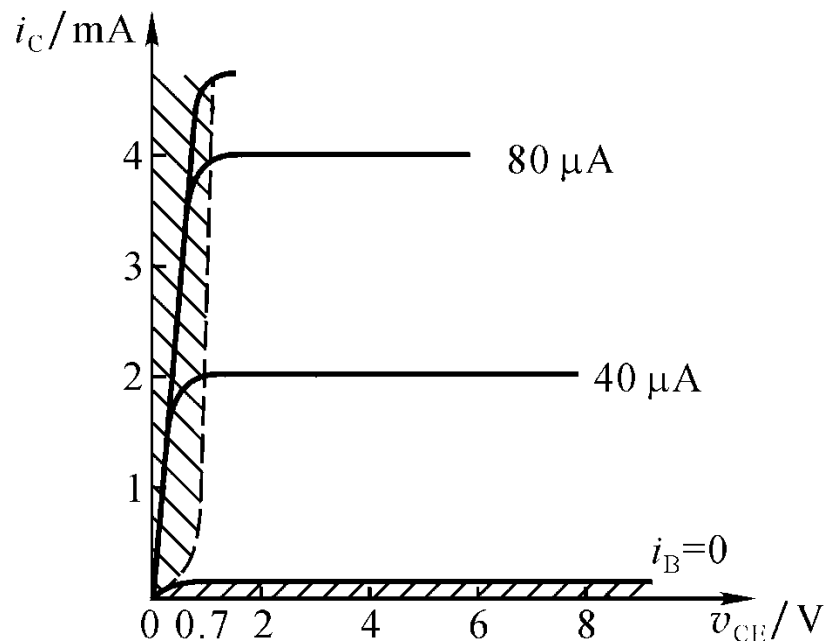
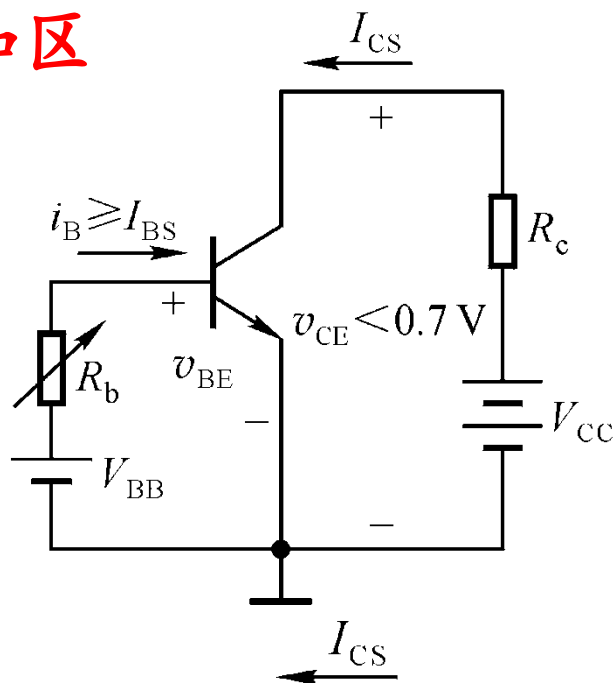
特征是 i_C 仅受 i_B 控制，与 v_{CE} 的大小无关，具有恒流特性。



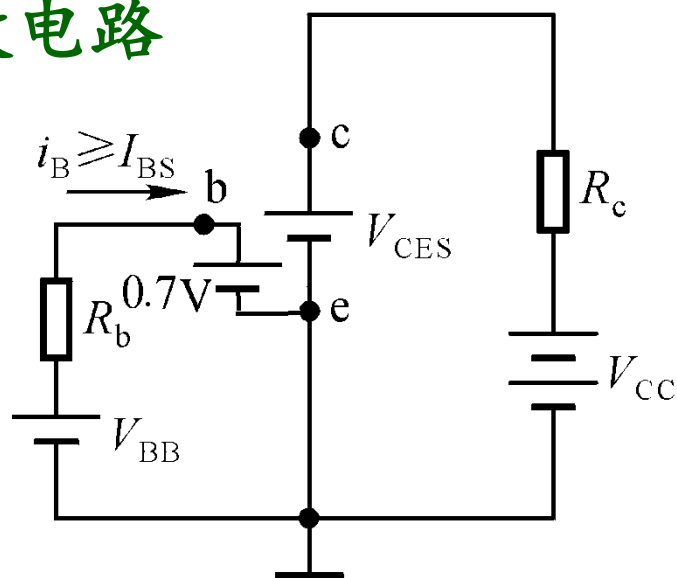
等效电路



☆ 饱和区



等效电路

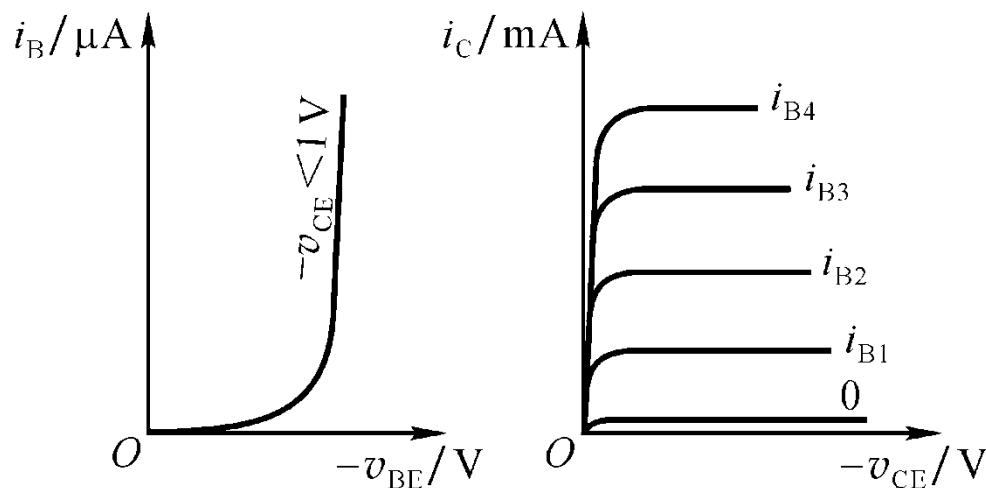
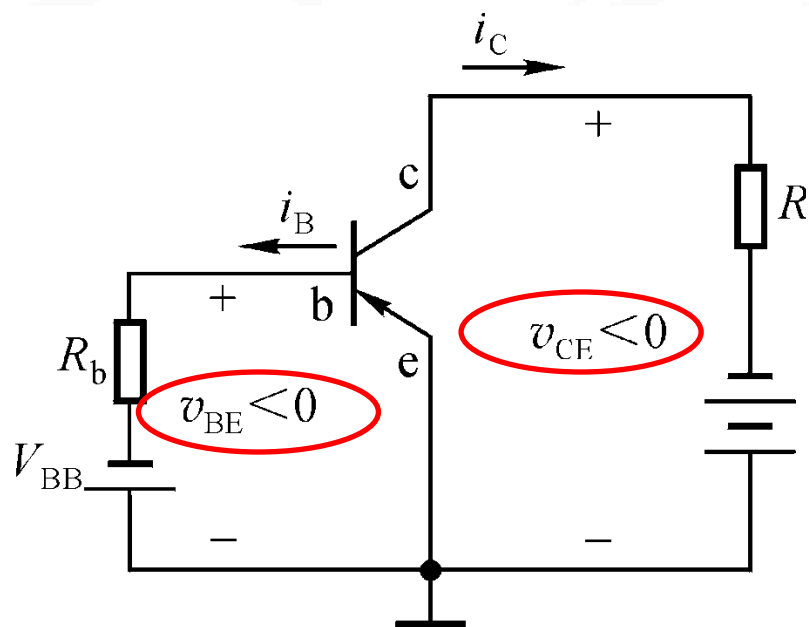


其特征是：若增大 i_B ，则 i_C 基本不变，三极管失去放大能力。

临界饱和： $V_{CES} = 0.7V$

深度饱和： $V_{CES} \approx 0.3V$

PNP型三极管

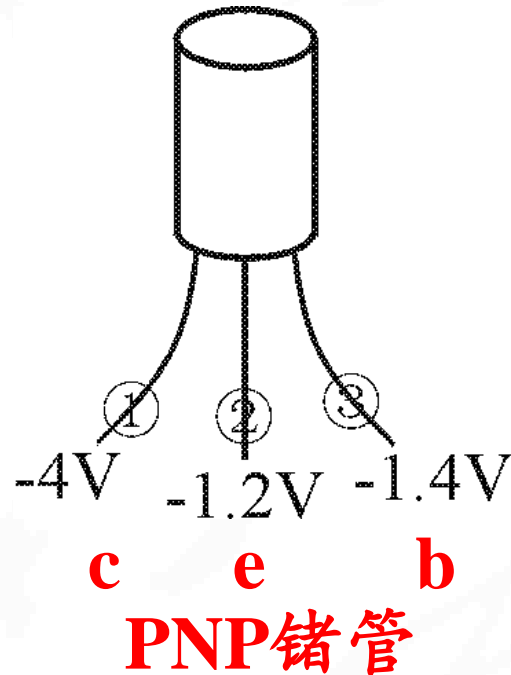
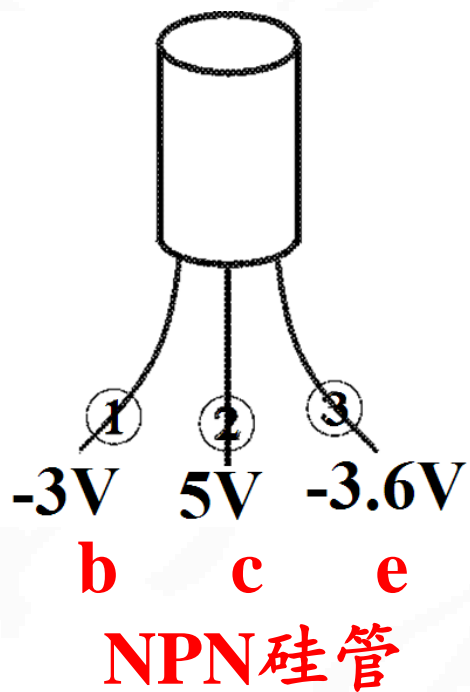


v_{BE} 、 v_{CE} 为负值

i_B 、 i_C 的实际流向与
NPN型管相反

横坐标为 $-v_{BE}$ 、 $-v_{CE}$

【例1】判断放大电路中三极管的类型、材料、电极。



【解】三极管工作在放大区的特点是：

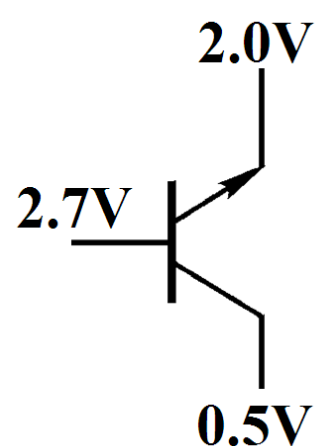
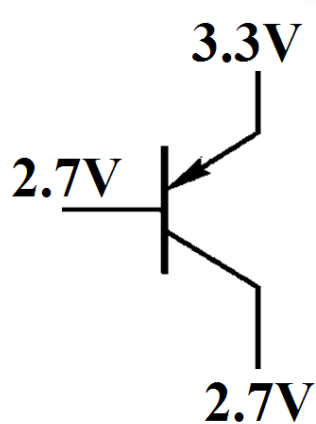
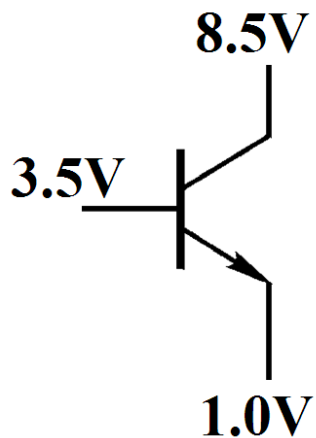
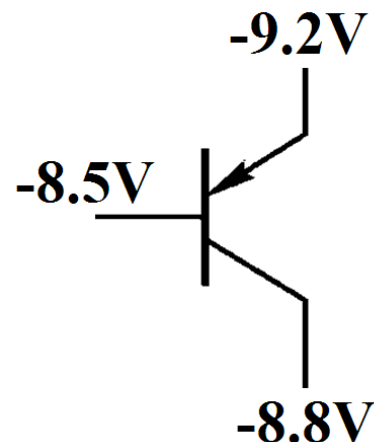
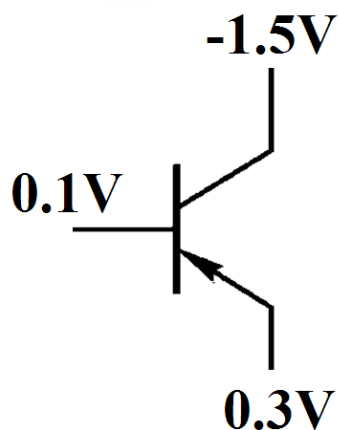
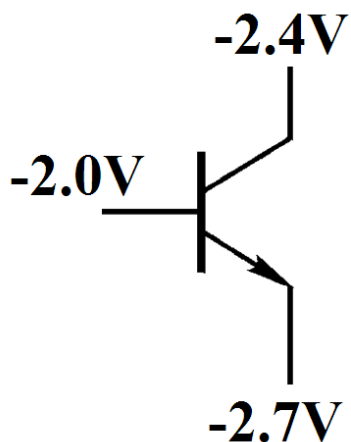
硅管： $|V_{BE}| \approx 0.7V$ ； 锗管： $|V_{BE}| \approx 0.2V$ 。

NPN管： $V_C > V_B > V_E$ ；

PNP管： $V_C < V_B < V_E$ 。

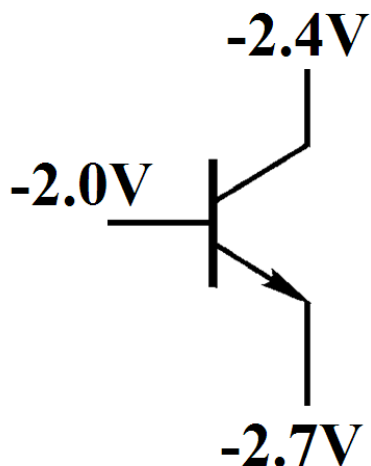


【例2】从图示各三极管电极上测得的电压数据中，分析各管所处的工作状态是处于放大、截止或饱和状态中的哪一种？或是已经损坏？

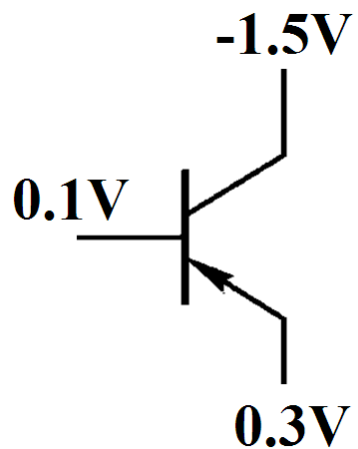




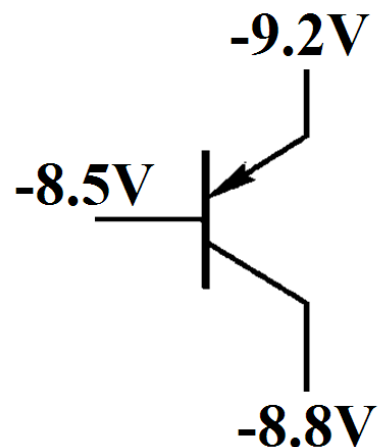
【解】



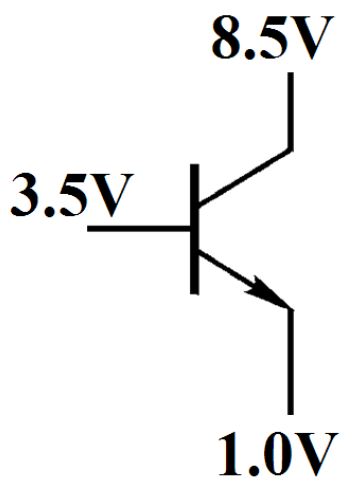
饱和状态



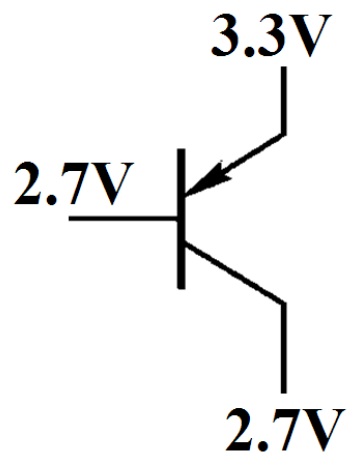
放大状态



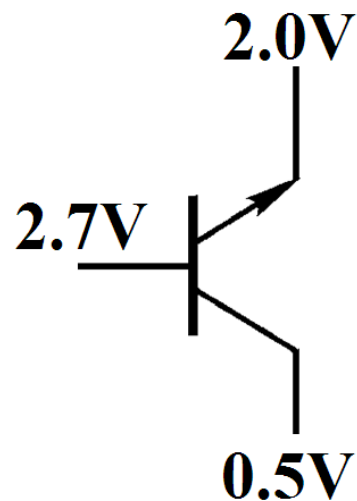
截止状态



损坏 (J_e 开路)



临界饱和



损坏 (J_c 开路)

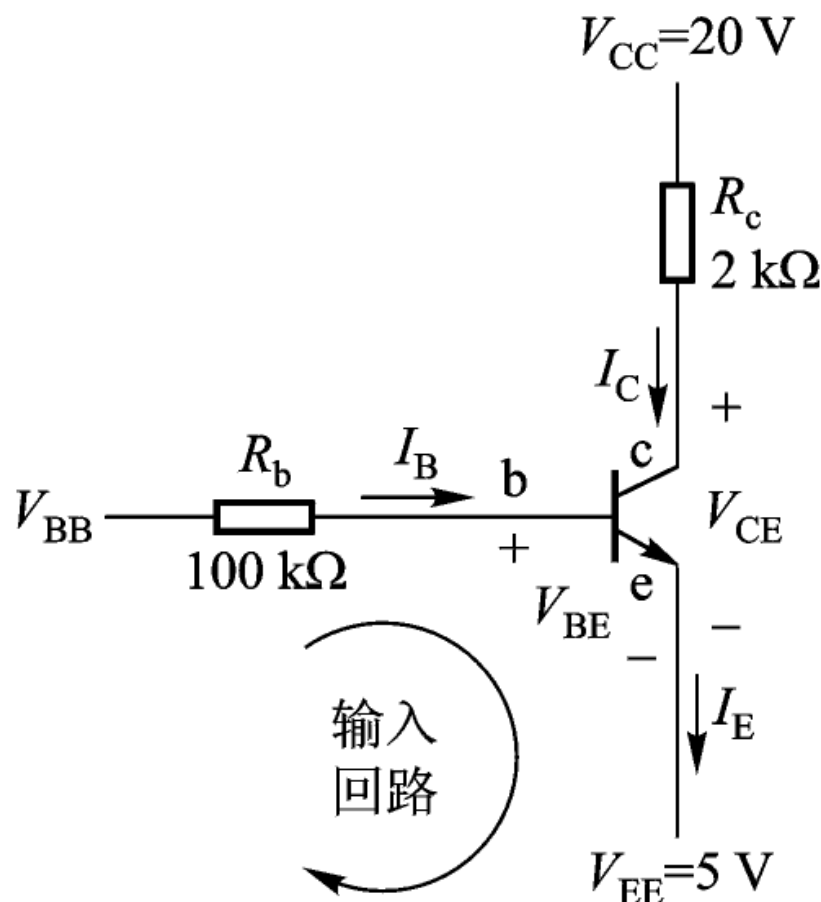
【例3】

设双极型硅三极管 $\beta=50$ ，计算 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 V_{CEQ} ，并确定三极管工作状态。

(1) $V_{BB}=15\text{ V}$ 。

(2) $V_{BB}=30\text{ V}$ 。

(3) $V_{BB}=-15\text{ V}$ 。





【解】

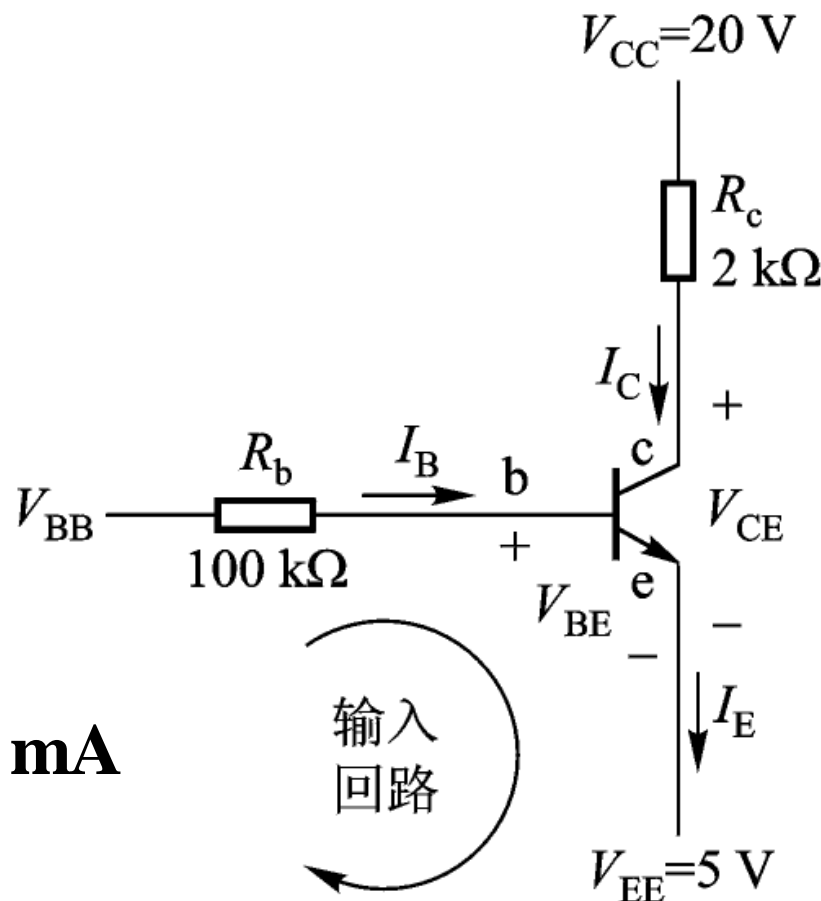
(1) 若 $V_{BB}=15\text{ V}$ 。

$$\begin{aligned} I_{BQ} &= \frac{V_{BB} - V_{EE} - V_{BE}}{R_b} \\ &= \frac{15 - 5 - 0.7}{100} = 0.093\text{ mA} \end{aligned}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.093 = 4.65\text{ mA}$$

$$\begin{aligned} V_{CEQ} &= V_{CC} - V_{EE} - I_{CQ} R_C \\ &= 20 - 5 - 4.65 \times 2 = 5.7\text{ V} \end{aligned}$$

三极管工作在放大区。



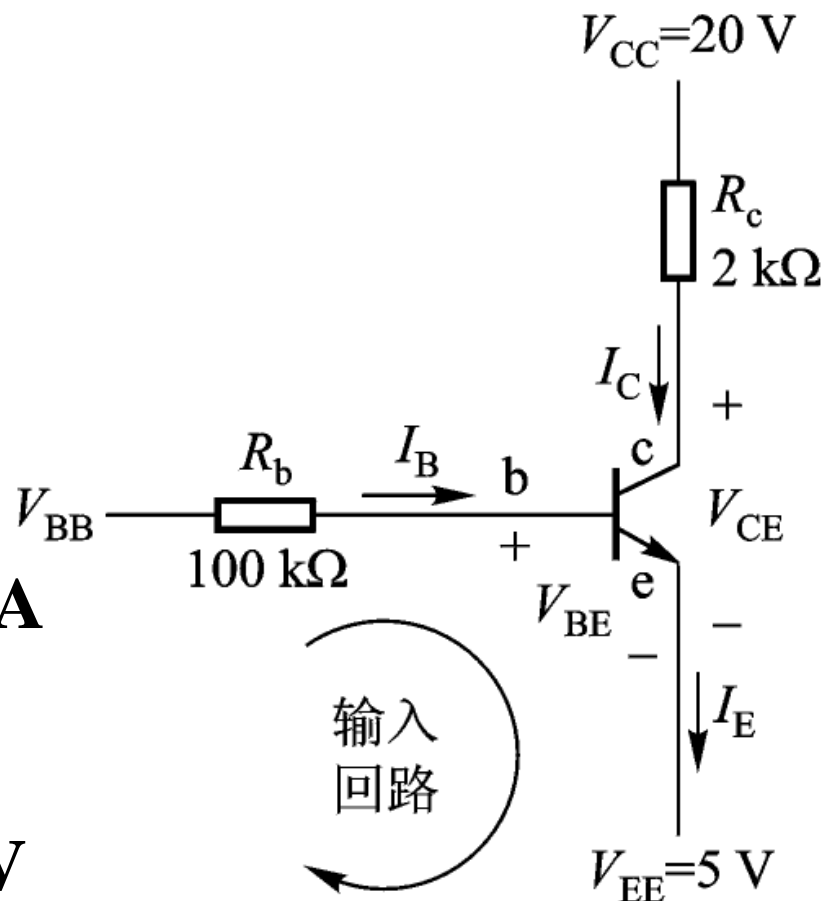


(2) 若 $V_{BB} = 30 \text{ V}$ 。

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{EE} - V_{BE}}{R_b}$$
$$= \frac{30 - 5 - 0.7}{100} = 0.24 \text{ mA}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 50 \times 0.24 = 12 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - V_{EE} - I_{CQ} R_C$$
$$= 20 - 5 - 12 \times 2 = -9.0 \text{ V}$$



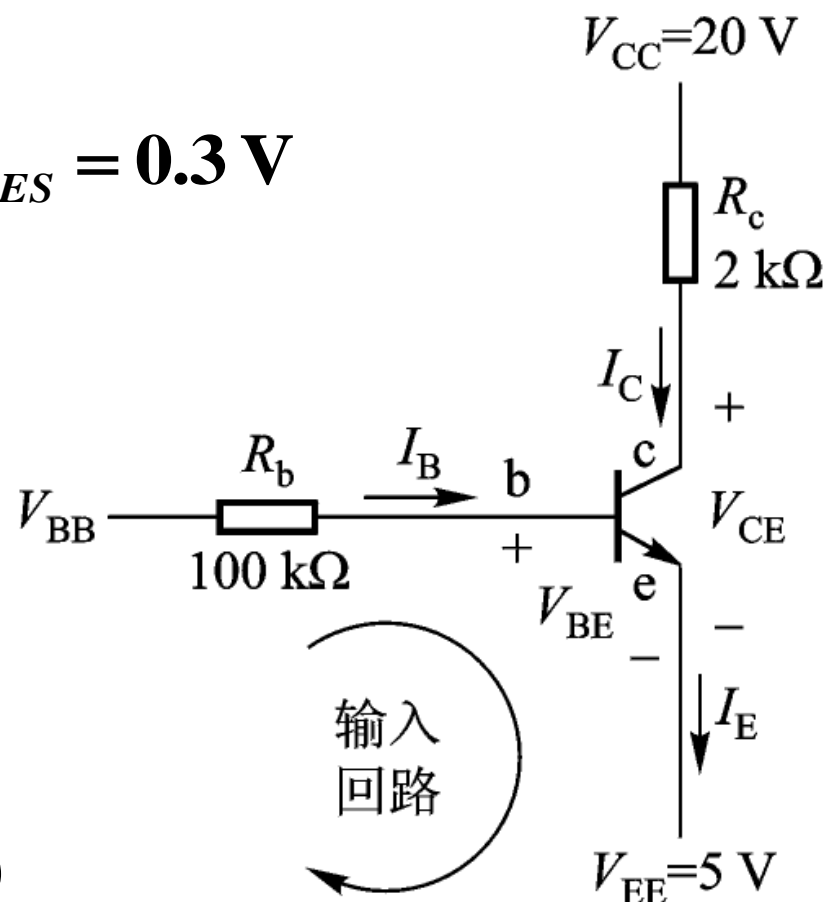
上述计算是在假定三极管工作在**放大区**的前提下进行的。但 $V_{CEQ} < 0.7 \text{ V}$ 表明三极管事实上无法工作在放大区，只能处于**饱和区**。

按饱和区重新计算：

$$I_{BQ} = 0.24 \text{ mA} \quad V_{CEQ} = V_{CES} = 0.3 \text{ V}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - V_{EE}}{R_c}$$

$$= \frac{20 - 0.3 - 5}{2} = 7.35 \text{ mA}$$



(3) 若 $V_{BB} = -15 \text{ V}$ 。

$$I_{BQ} = 0 \quad I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 0$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - V_{EE} - I_{CQ} R_C = 15 \text{ V}$$

三极管工作在截止区。

【例4】

已知 $\beta = 50$ ，求集电极电流 I_C 和集射间电压 V_{CE} 。

【解】

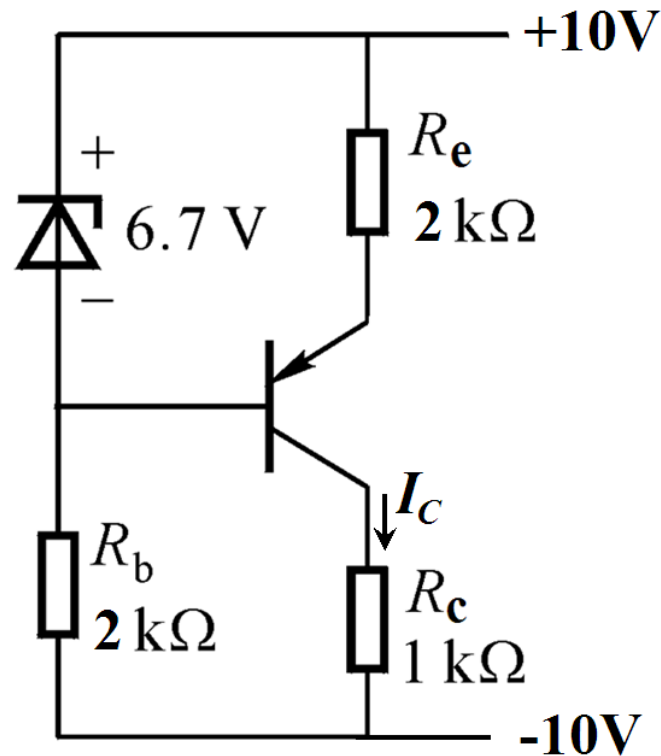
$$I_E = \frac{6.7\text{V} - 0.7\text{V}}{R_e} = 3\text{mA}$$

$$V_{EC} = 20\text{V} - I_E(R_e + R_c) = 11\text{V}$$

$|V_{CE}| > 0.7\text{V}$ (或 $V_{CE} < -0.7\text{V}$)，
可见三极管处于放大区。

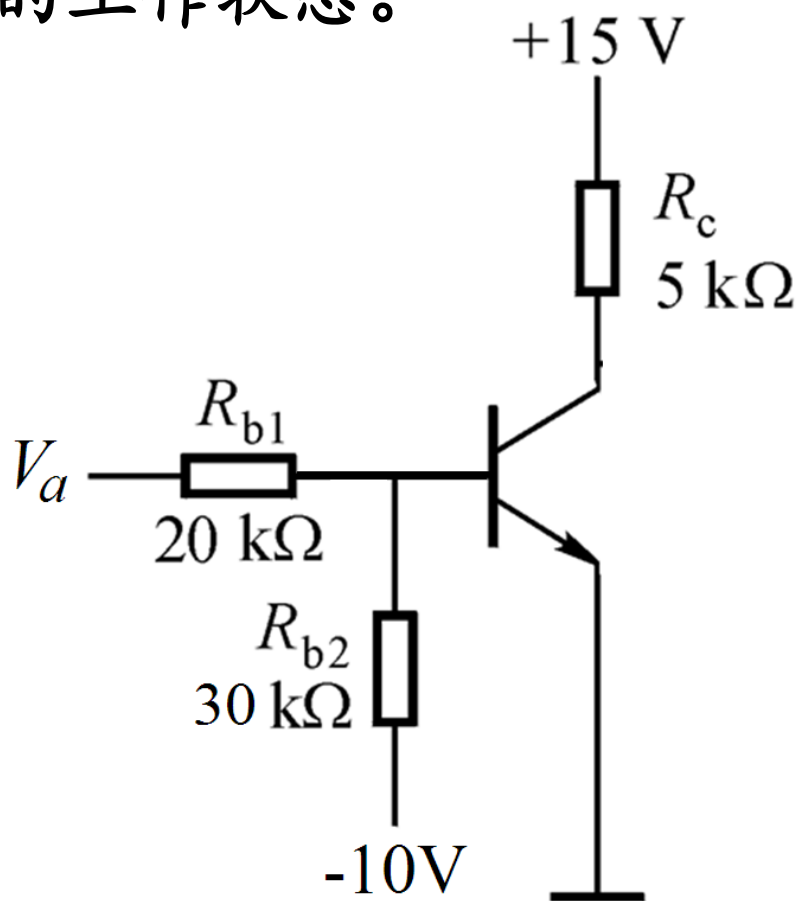
$$I_C = I_E = 3\text{mA}$$

$$V_{CE} = -V_{EC} = -11\text{V}$$

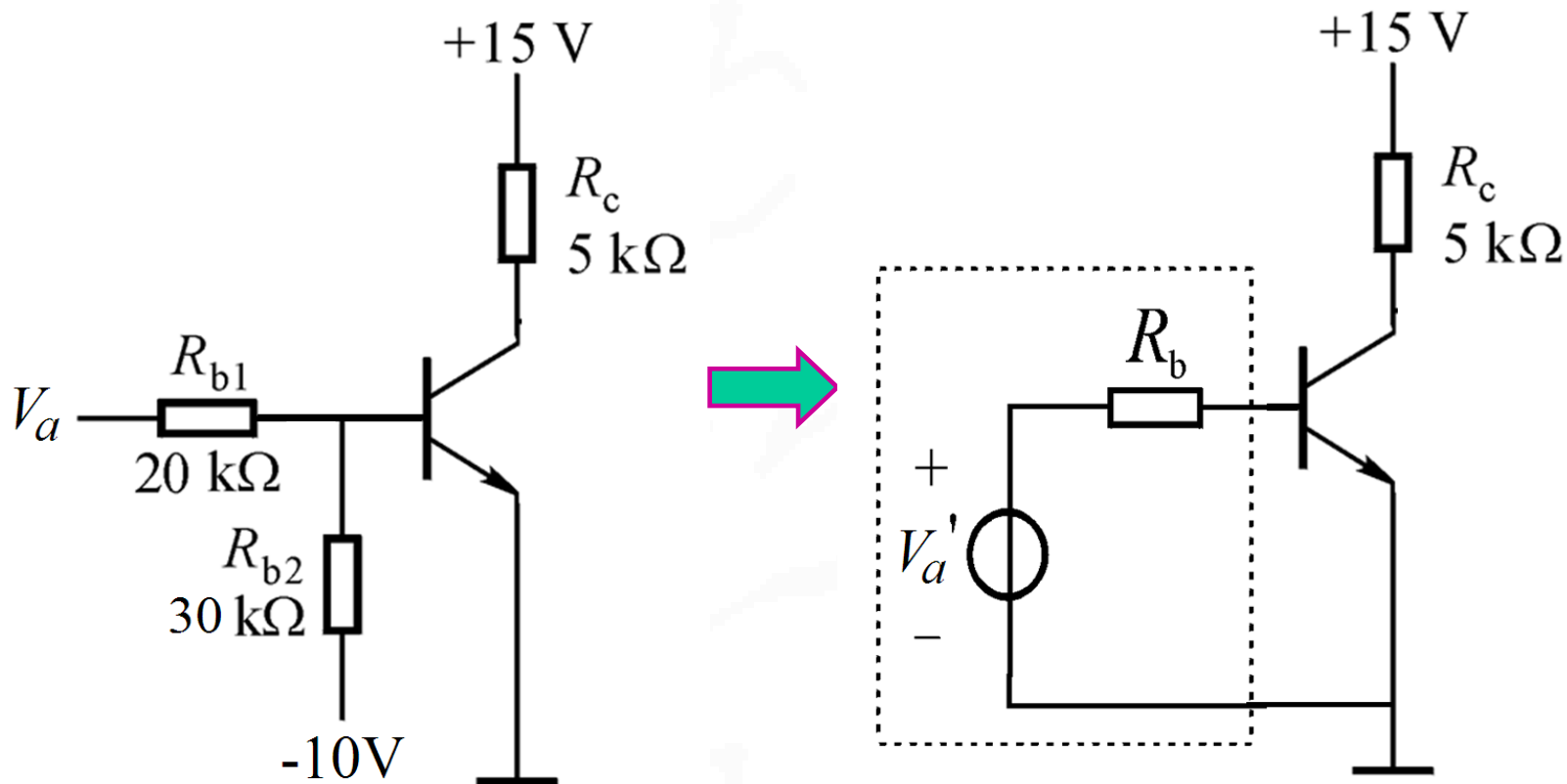


【例5】

电路如图，设三极管为硅管， $\beta = 50$ ， $V_{CES} = 0.3 \text{ V}$ 。分别计算 $V_a = 5 \text{ V}$ 和 $V_a = 10 \text{ V}$ 时的 I_C 和 V_{CE} ，并说明三极管的工作状态。



【解】 1) 当 $V_a = 5\text{ V}$ 时:



$$V_a' = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_a + \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} (-10\text{ V}) = -1\text{ V}$$

三极管截止, $I_C = 0$, $V_{CE} = 15\text{ V}$ 。

2) 当 $V_a = 10 \text{ V}$ 时:

$$V_a' = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_a + \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} (-10 \text{ V}) = 2 \text{ V}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2} = 12 \text{ k}\Omega$$

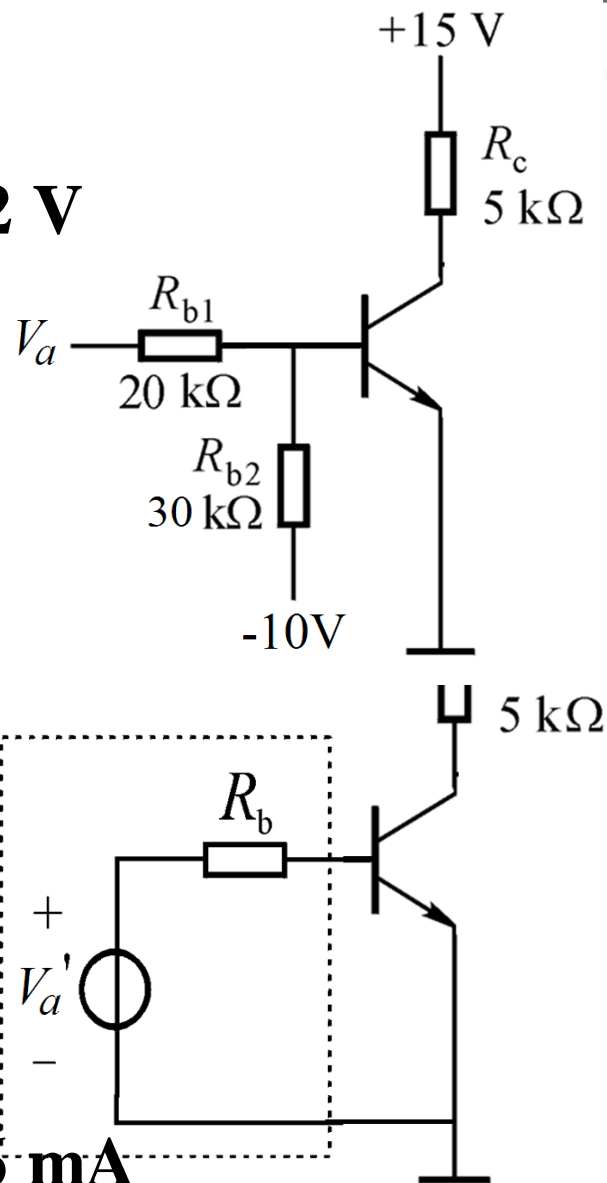
$$I_B = \frac{V_a' - 0.7}{R_b} = 1.08 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 1.08 = 50.4 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 - I_C R_c = -235 \text{ V}$$

说明三极管已饱和，需重新计算。

$$V_{CE} = V_{CES} = 0.3 \text{ V} \quad I_C = \frac{15 - 0.3}{R_c} = 2.86 \text{ mA}$$





三、三极管的主要参数

1、电流放大倍数

✧ 共射极直流电流放大倍数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

✧ 共射极交流电流放大倍数

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{i_{C2} - i_{C1}}{i_{B2} - i_{B1}}$$

$\bar{\beta} \approx \beta$ β 典型值为20~200

✧ 共基极直流电流放大倍数

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E}$$

✧ 共基极交流电流放大倍数

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{i_{C2} - i_{C1}}{i_{E2} - i_{E1}}$$

$\bar{\alpha} \approx \alpha$ α 典型值为0.95~0.995

2、极间反向电流

✧ 集电结反向饱和电流 I_{CBO}

是指发射极开路，集电极与基极之间加反向电压时的反向饱和电流(μA 级)。与单个PN结的反向电流一样，主要取决于温度和少子浓度。

✧ 穿透电流 I_{CEO}

是指基极开路，集电极与发射极之间加反向电压时，从集电极穿过基区流入发射极的反向饱和电流。

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$$

I_{CEO} 是衡量三极管性能稳定与否的重要参数之一，其值愈小愈好。 I_{CBO} 和 I_{CEO} 与温度密切相关。

3、极限参数

✧ 集电极最大允许电流 I_{CM}

当 i_C 超过 I_{CM} 时，电流放大倍数 β 将显著下降。

✧ 集电极最大允许功耗 P_{CM}

P_{CM} 表示集电结上允许的耗散功率的最大值。

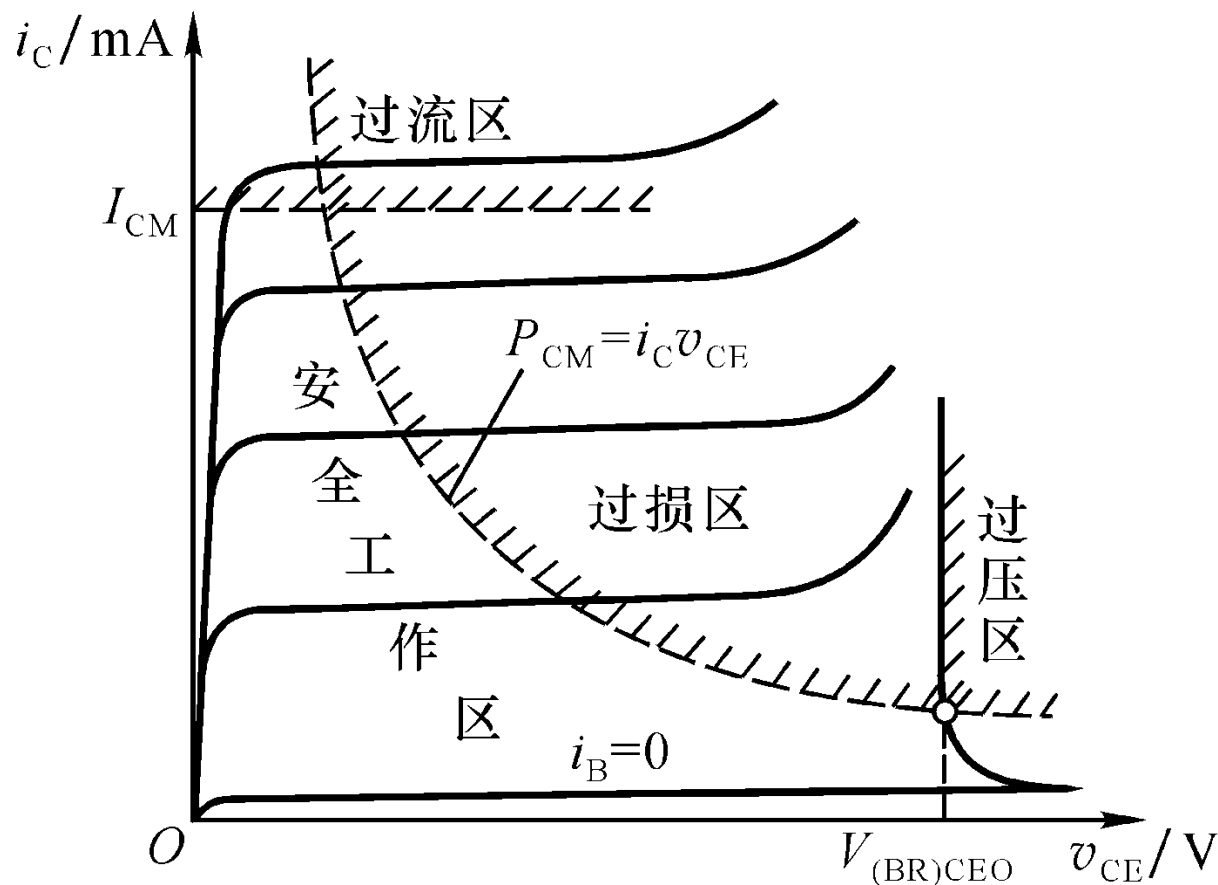
主要由管子所允许的温升及散热条件决定。当超过 P_{CM} 时，管子可能烧毁。

✧ 反向击穿电压

超过反向击穿电压时，管子将发生击穿。反向击穿电压的大小不仅与管子本身的特性有关，还与外电路的接法有关。

$$V_{(BR)CBO} \approx V_{(BR)EBO} > V_{(BR)CER} > V_{(BR)CEO}$$

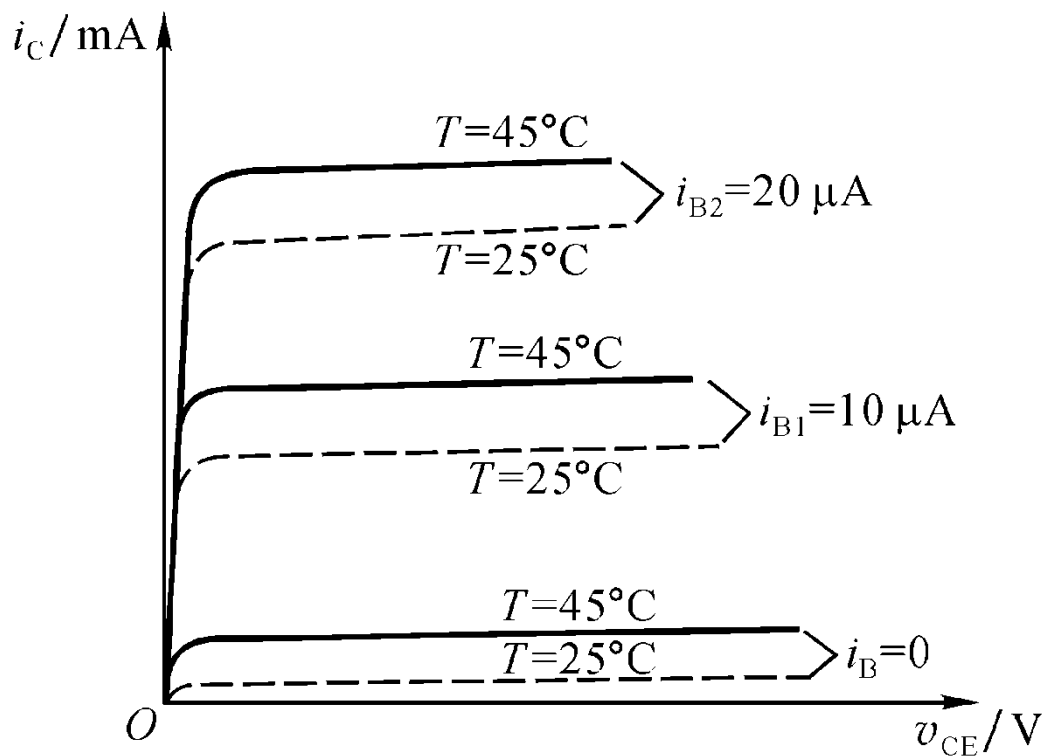
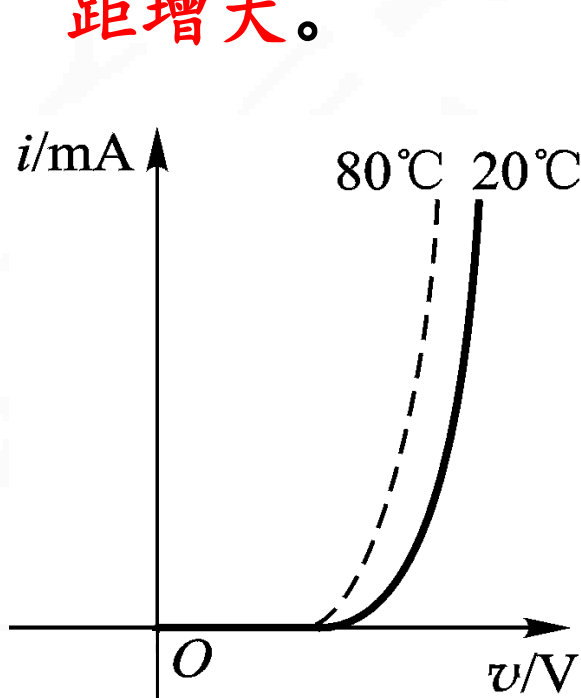
➤ 安全工作区 (Safe Operation Area)



由三极管的三个极限参数： P_{CM} 、 I_{CM} 和 $V_{(BR)CEO}$ ，在输出特性曲线上可画出安全工作区。

4、温度稳定性

- ✧ 输入特性：温度上升时，**发射结电压下降**（负温度特性），温度系数约为 $-2.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。
- ✧ 输出特性：温度上升时，输出特性**曲线上移，间距增大**。





3.3 场效应管

场效应管也称场效应晶体管或场效应三极管，常用**FET**表示（**Field Effect Transistor**）。具有输入电阻高、热稳定性好、工艺简单、易于集成等优点。

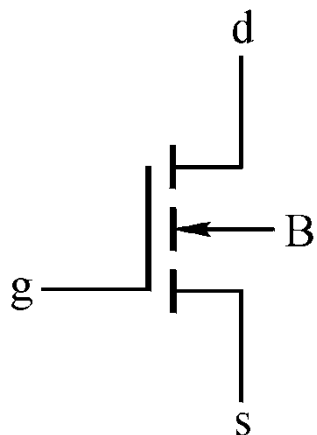
- 场效应管分类：**Metal-Oxide-Semiconductor**
- ✧ 绝缘栅型IGFET(或MOS)（**Insulated Gate Type**）
 - 增强型MOS（**Enhancement**）
 - 耗尽型MOS（**Depletion**）
- ✧ 结型JFET（**Junction Type**）
 - 本质上是耗尽型，分为N沟道和P沟道。

每一种又可分为N沟道和P沟道。

一、绝缘栅场效应管 (MOSFET)

1、结构、类型、符号

➤ NMOS增强型



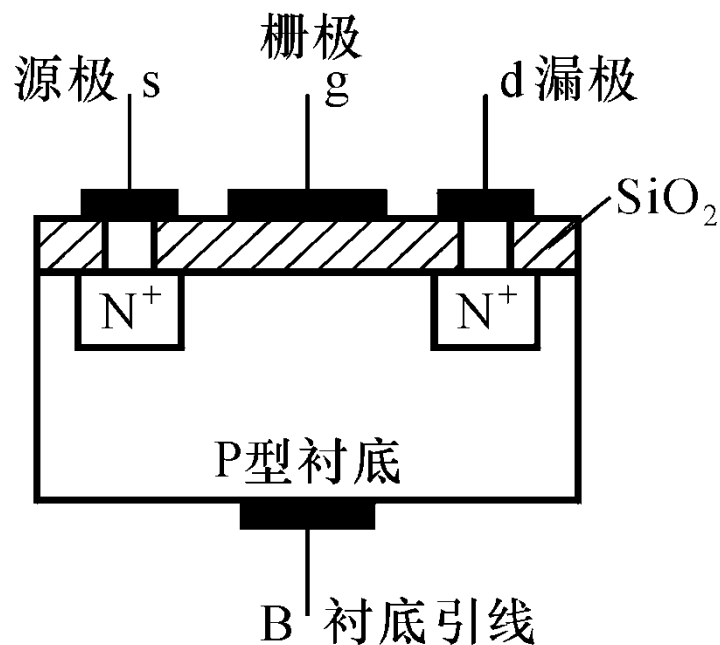
s: Source 源极

d: Drain 漏极

g: Gate 栅极

B: Base 衬底

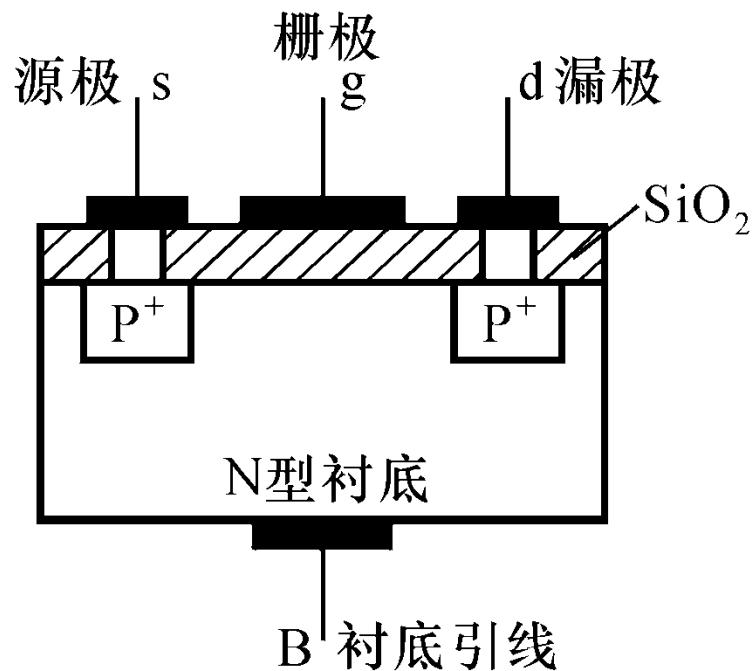
MOS管的栅极与其它电极**绝缘**，所以输入电阻近似为 ∞ ， $i_G \approx 0$ 。



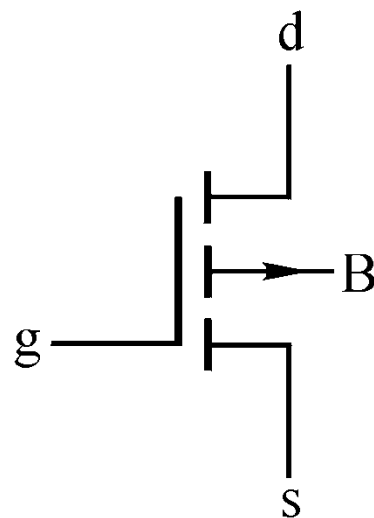
在P型衬底上加2个N⁺区，P型表面加SiO₂绝缘层，在N⁺区加铝极。



➤ PMOS增强型



PMOS与NMOS的工作原理完全相同，只是电流和电压方向不同。



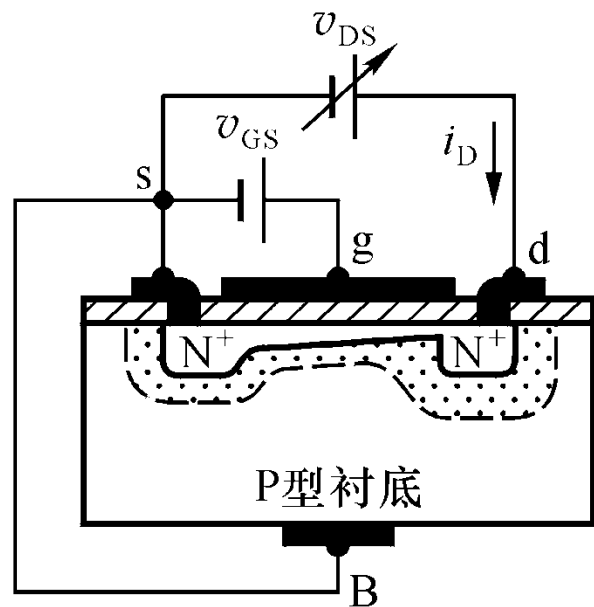
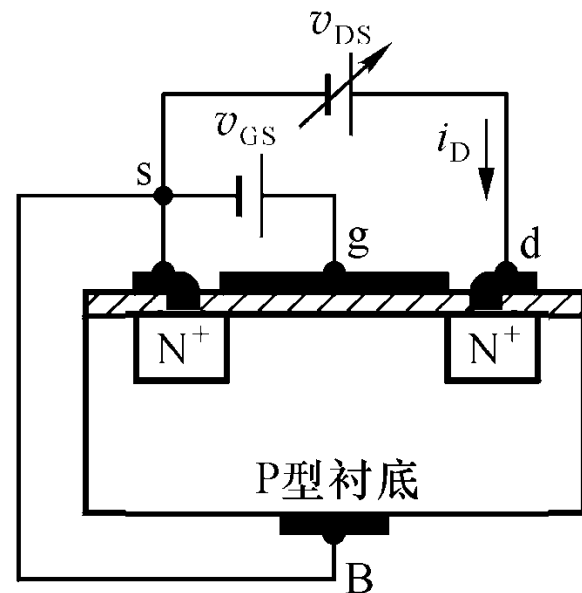
箭头表示沟道的实际电流方向。

2、增强型MOS管工作原理（以N沟道为例）

① $v_{GS}=0$, v_{DS} 较小：没有导电沟道（漏源间只是两个“背向”串联的PN结），所以d-s间呈现高阻， $i_D \approx 0$ 。

② 当 $v_{GS} > 0$ ，且当 v_{GS} 增强到足够大： v_{GS} 产生一个垂直电场，它使漏-源之间的P型硅表面感应出电子层（反型层），使两个 N^+ 区连通，形成N型导电沟道。

开始形成导电沟道所需的最小电压称为开启电压 $V_{GS(th)}$ （习惯上常表示为 V_T ）。

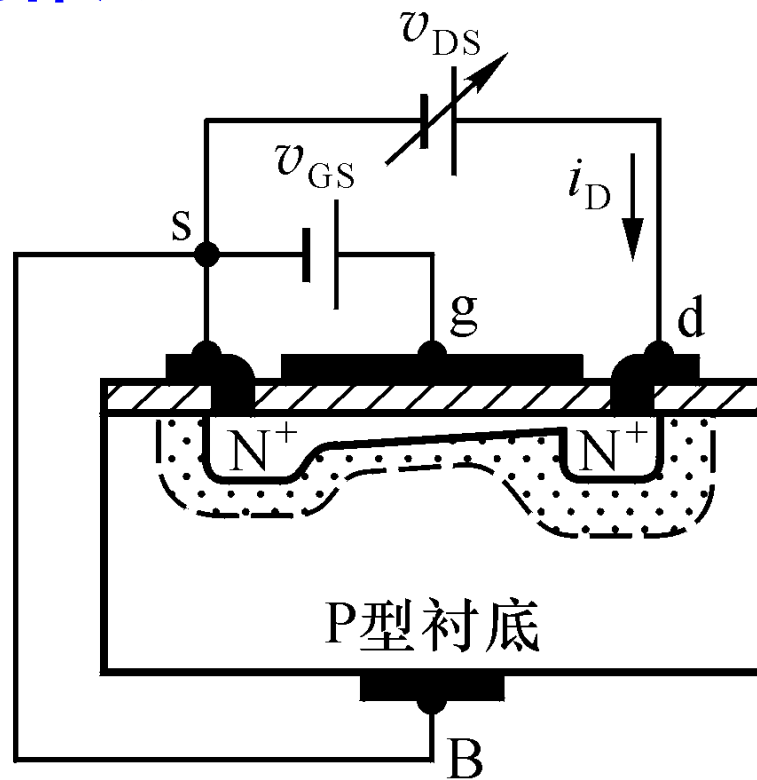


➤ $v_{GS} > V_T$ 时, v_{GS} 对 i_D 的控制作用。

✧ v_{GS} 越大, 导电沟道越宽。

✧ 导电沟道越宽, 相当于沟道的等效电阻越小。

✧ 所以, v_{GS} 越大, 漏极电流 i_D 也越大。 v_{GS} 对 i_D 有控制作用。



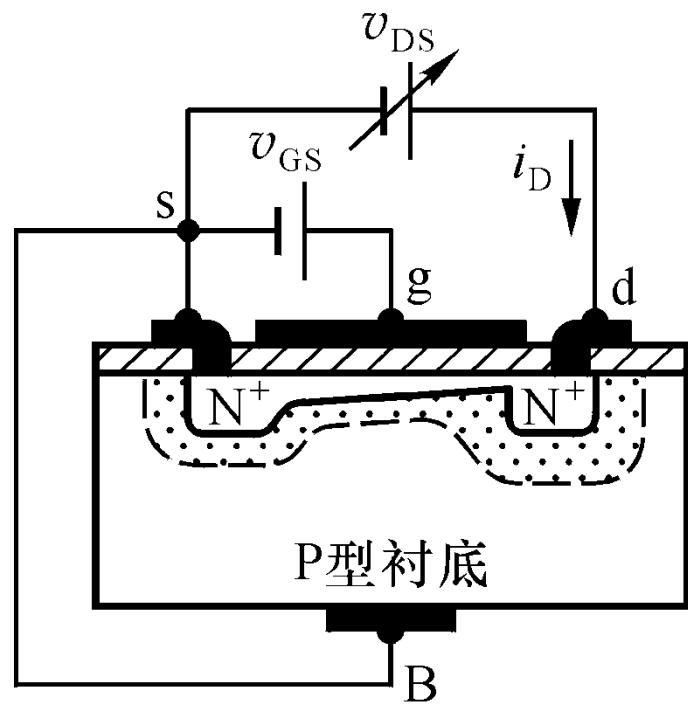
当 $v_{GS} = 0$ 时没有导电沟道, 而当 v_{GS} 增强到 $> V_T$ 时才形成沟道, 所以称为**增强型**MOS管。并且 v_{GS} 越大, 导电沟道越宽, i_D 越大。

③ $v_{GS} > V_T$ 且为定值时, v_{DS} 对 i_D 的影响

漏-源电压 v_{DS} 产生**横向电场**：由于沟道电阻的存在，使电场产生不均匀分布。近s端电压差较高，为 v_{GS} ；近d端电压差较低，为 $v_{GD} = v_{GS} - v_{DS}$ ，所以沟道呈**楔形分布**。

✧ 当 v_{DS} 较小时： v_{DS} 对导电沟道的影响不大，沟道主要受 v_{GS} 控制。所以在 v_{GS} 为定值时，沟道电阻保持不变， i_D 随 v_{DS} 增加而线性增加。

$$\begin{aligned} v_{GS} - v_{DS} &> V_T \\ 0 < v_{DS} &< v_{GS} - V_T \end{aligned}$$

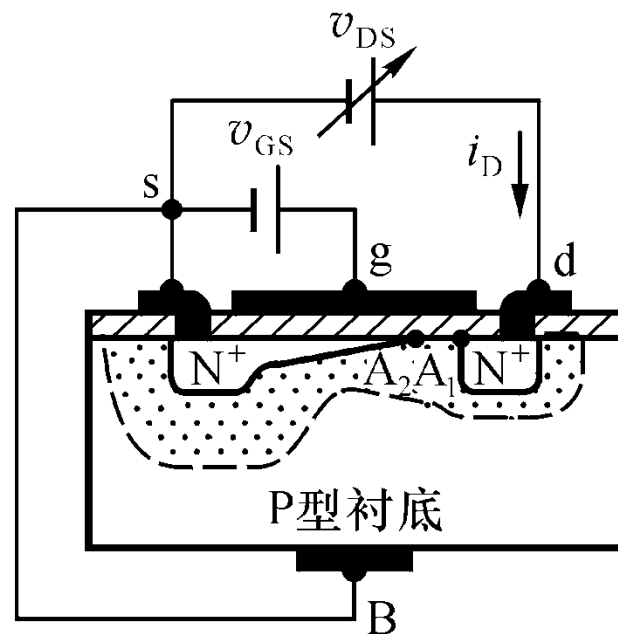
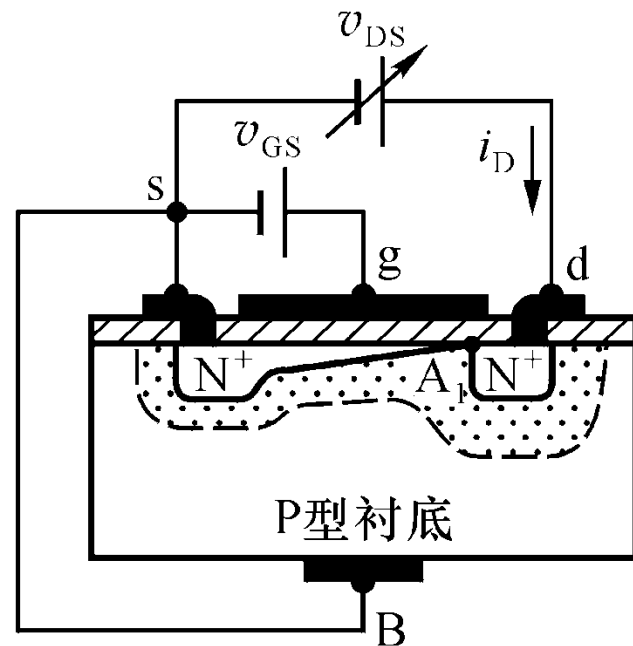


✧ 当 v_{DS} 增加到 $v_{GS} - v_{DS} = V_T$ 时
(即 $v_{DS} = v_{GS} - V_T$) : 漏端
沟道消失, 称为“预夹
断”。

✧ 当 v_{DS} 再增加时 (即 $v_{DS} > v_{GS} - V_T$) : i_D 将不再增加, 趋向
饱和。因为 v_{DS} 再增加时, 近
漏端上的预夹断点向S极延伸,
使 v_{DS} 的增加部分降落在预夹
断区, 以维持 i_D 的大小。

$$v_{GS} - v_{DS} < V_T$$

$$v_{DS} > v_{GS} - V_T$$



3、伏安特性与电流方程

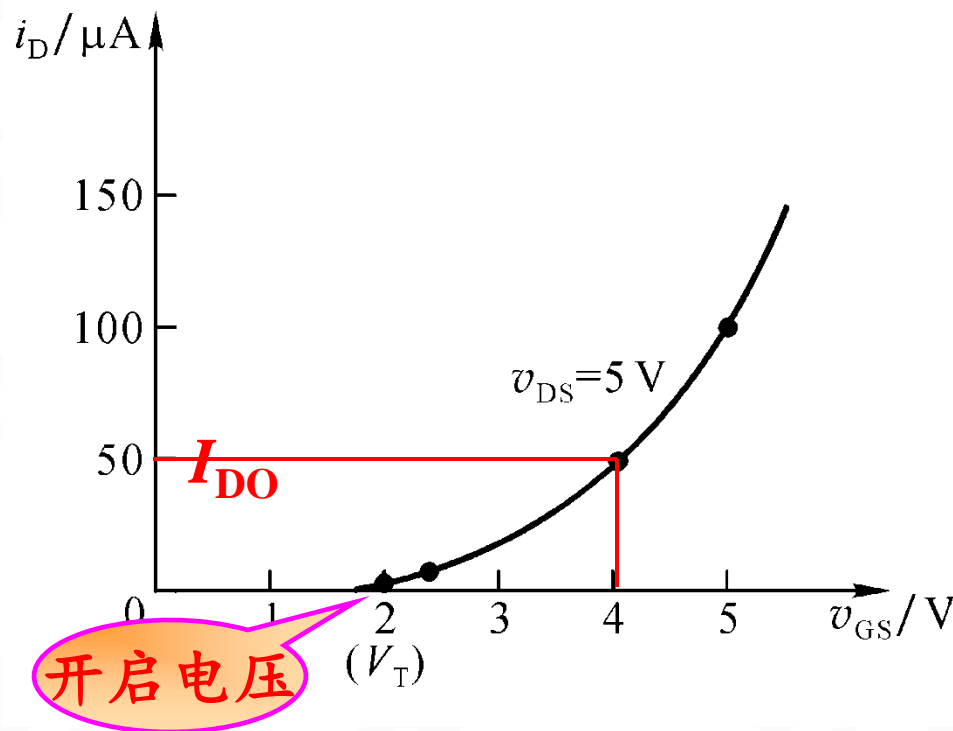
(1) 增强型NMOS管的转移特性

在一定 v_{DS} 下，栅-源电压 v_{GS} 与漏极电流 i_D 之间的关系。

$$i_D = f(v_{GS})|_{v_{DS}=const}$$

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{v_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2$$

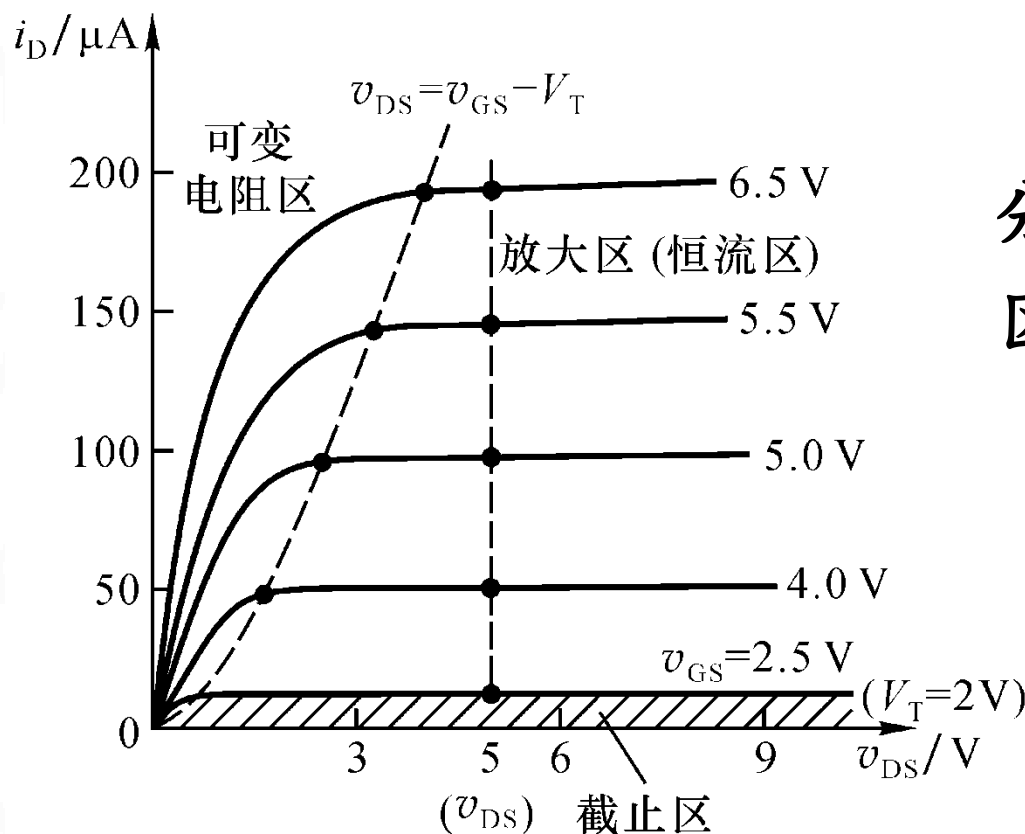
I_{DO} 是 $v_{GS}=2V_T$ 时的漏极电流。



(2) 输出特性（漏极特性）

表示漏极电流 i_D 与漏-源电压 v_{DS} 之间的关系。

$$i_D = f(v_{DS}) |_{v_{GS} = \text{const}}$$



特性与三极管相似，分为3个工作区，但工作区的作用有所不同。

- 可变电阻区
- 放大区(恒流区、饱和区)
- 截止区(夹断区)

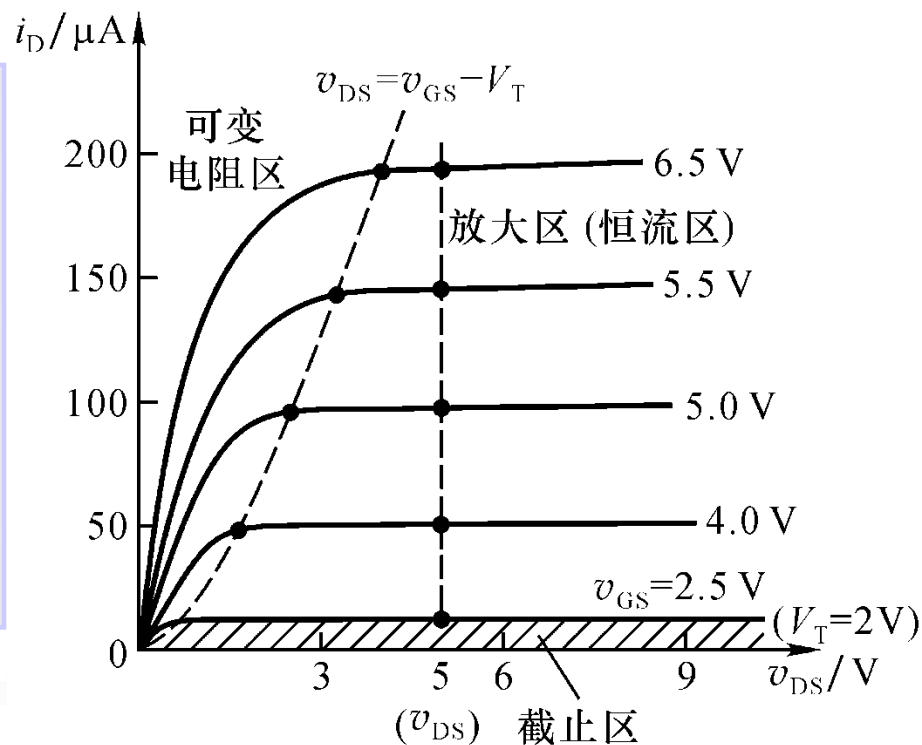
◇ 可变电阻区

管子导通，但尚未预夹断，即满足的条件为：

$$v_{GS} > V_T, v_{GS} - v_{DS} > V_T$$

可变电阻区的特征是
 i_D 不仅受 v_{GS} 的控制，而且随 v_{DS} 增大而线性增大。
可模拟为受 v_{GS} 控制的压控电阻 R_{DS} 。

$$R_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_D} \Big|_{v_{GS} = \text{const}}$$



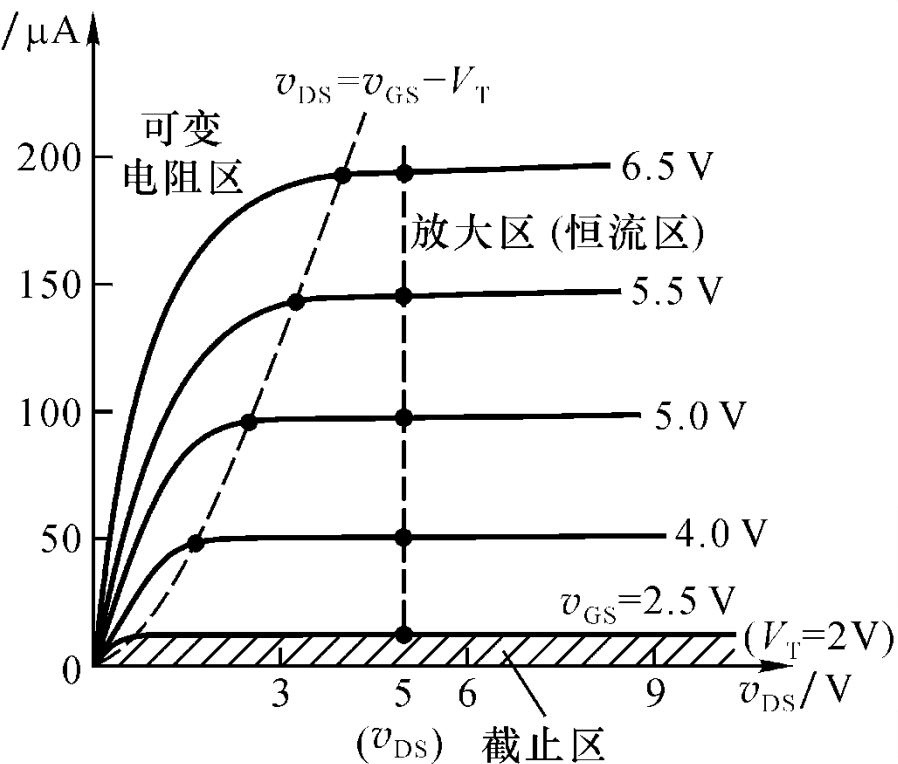
◇ 放大区

又称恒流区、饱和区。 $i_D/\mu\text{A}$

条件是：

$$v_{GS} > V_T, v_{GS} - v_{DS} \leq V_T$$

特征是 i_D 主要受 v_{GS} 控制，与 v_{DS} 几乎无关，表现为较好的恒流特性。



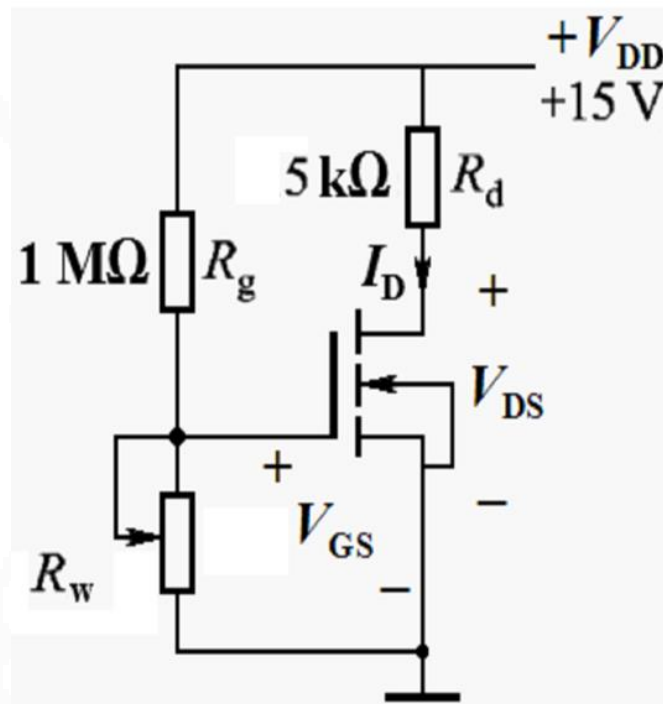
◇ 夹断区

又称截止区。指管子未导通($v_{GS} < V_T$)时的状态。

$$i_D \approx 0$$

【例1】

设场效应管为增强型NMOS，
开启电压 $V_T=2.5\text{V}$ ， $I_{D0}=2\text{mA}$ 。
当 $R_w=50\text{k}\Omega$ 和 $R_w=500\text{k}\Omega$ 时，
分别求场效应管的 V_{GS} 、 I_D 、 V_{DS} 。



【解】 1、当 $R_w=50\text{k}\Omega$ 时

$$V_{GSQ} = \frac{R_w \cdot V_{DD}}{R_g + R_w} = \frac{50 \times 15}{1000 + 50} = 0.71 \text{ V}$$

因 $V_{GS} < V_T$ ，FET管为截止区， $I_D=0$ ， $V_{DS}=15\text{V}$

2、当 $R_w = 500\text{k}\Omega$ 时

$$V_{GSQ} = \frac{R_w \cdot V_{DD}}{R_g + R_w} = \frac{500 \times 15}{1000 + 500} = 5 \text{ V}$$

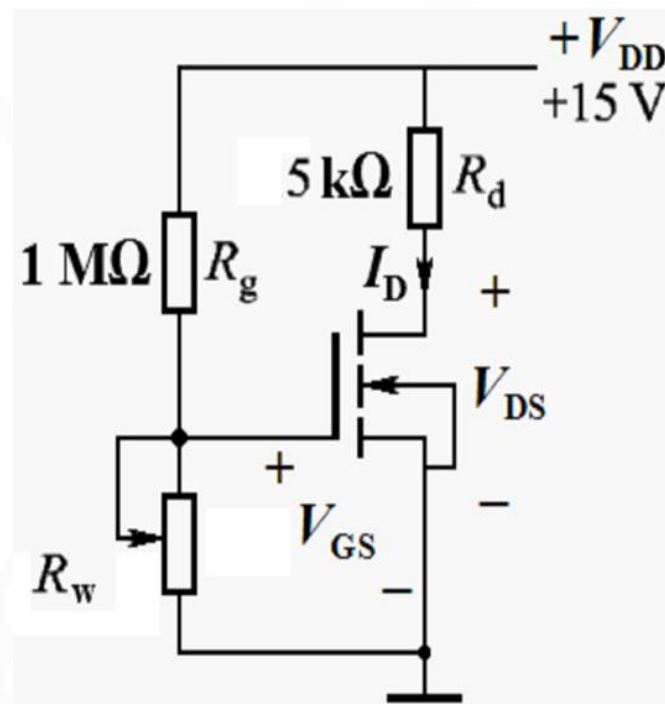
FET管导通，设为放大区

$$\begin{aligned} I_{DQ} &= I_{DO} \left(\frac{V_{GS}}{V_T} - 1 \right)^2 \\ &= 2 \times \left(\frac{5}{2.5} - 1 \right)^2 = 2\text{mA} \end{aligned}$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d = 15 - 2 \times 5 = 5 \text{ V}$$

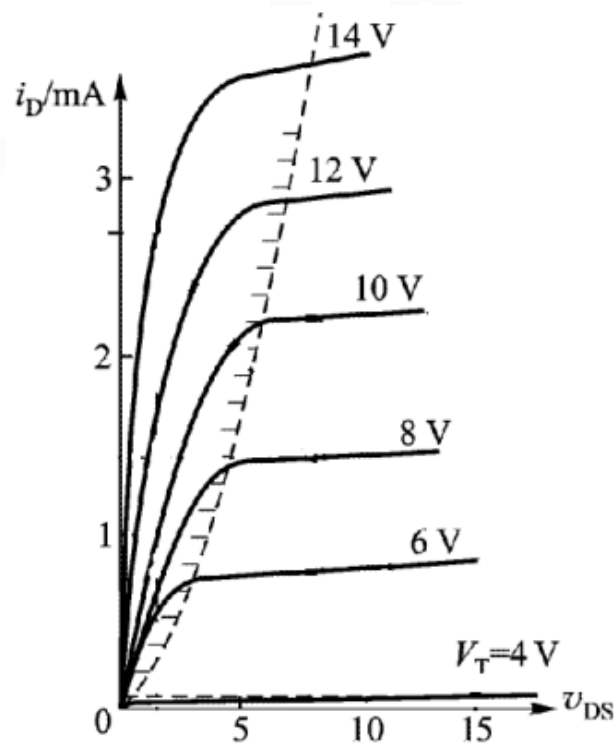
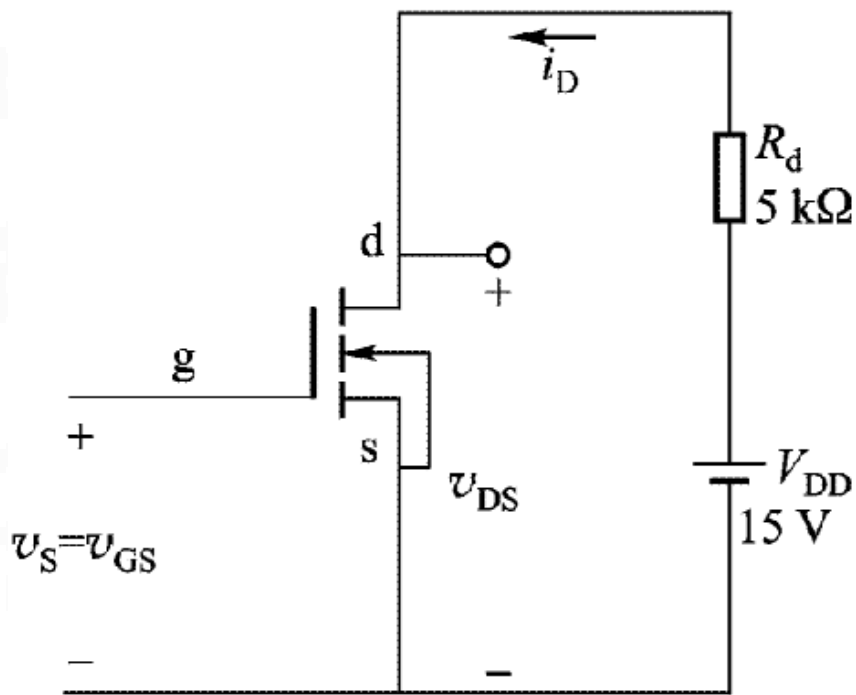
$$V_{DS} > V_{GS} - V_T = 5\text{V} - 2.5\text{V} = 2.5\text{V}$$

说明FET管工作在放大区（假设正确）。



【例2】

共源极放大电路如图所示，已知漏极特性曲线。分析当 2V、4V、6 V、8V、10V、12V 时，场效应管各处于什么工作区？





【解】 判断工作区。

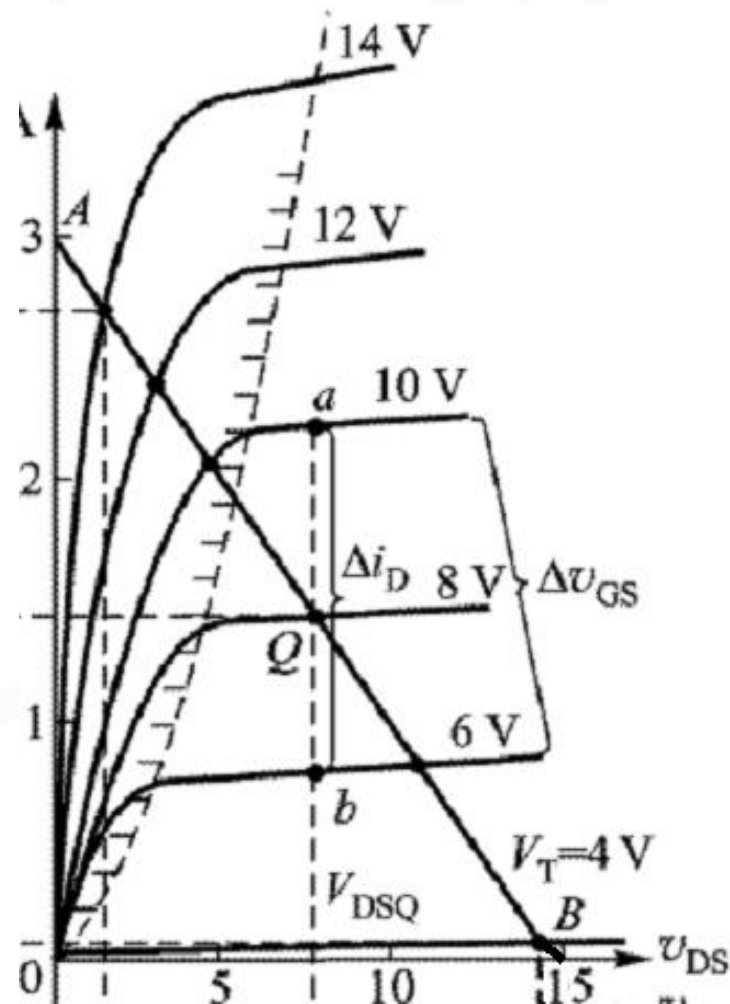
画出负载线：

$$\begin{aligned} i_D &= \frac{V_{DD} - v_{DS}}{R_d} \\ &= \frac{15 - v_{DS}}{5} \end{aligned}$$

画出可变电阻区范围：

$$V_T = 4V; v_{DS} = v_{GS} - V_T$$

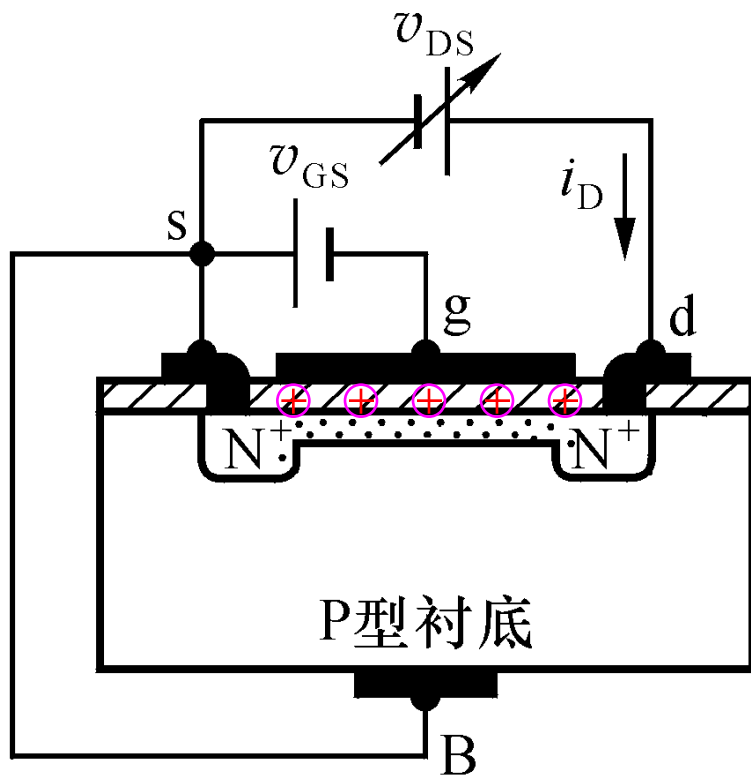
左侧为可变电阻区。



- $v_{GS} = 2V、4V$ ：工作在截止区；
- $v_{GS} = 6V、8V$ ：工作在恒流区；
- $v_{GS} = 10V、12V$ ：工作在可变电阻区。

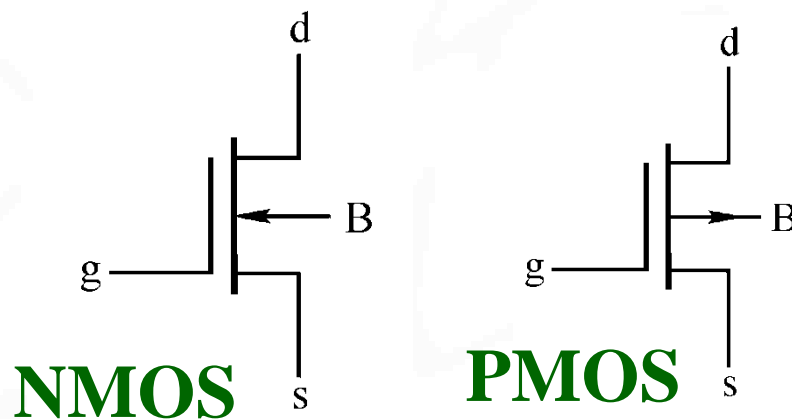
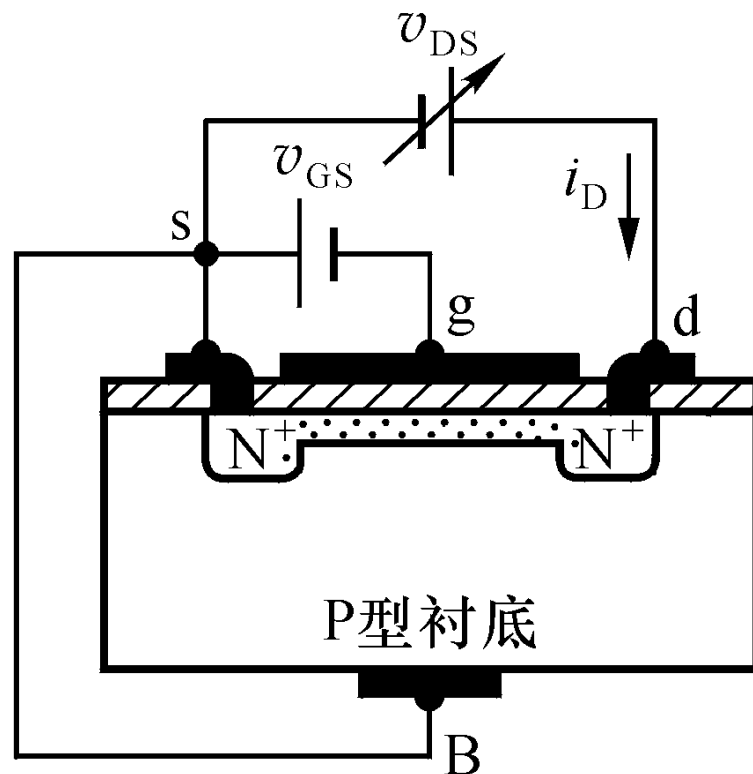
4、耗尽型MOS管

- ✧ 制造过程人为地在栅极下方的 SiO_2 绝缘层中掺入了大量的 K^+ (钾)或 Na^+ (钠)正离子。
- ✧ $v_{\text{GS}}=0$ ，靠正离子作用，使P型衬底表面感应出N型反型层，将两个 N^+ 区连通，形成原始的N型导电沟道。
- ✧ v_{DS} 一定，外加正栅压($v_{\text{GS}} > 0$)，导电沟道变厚，沟道等效电阻下降，漏极电流 i_{D} 增大；

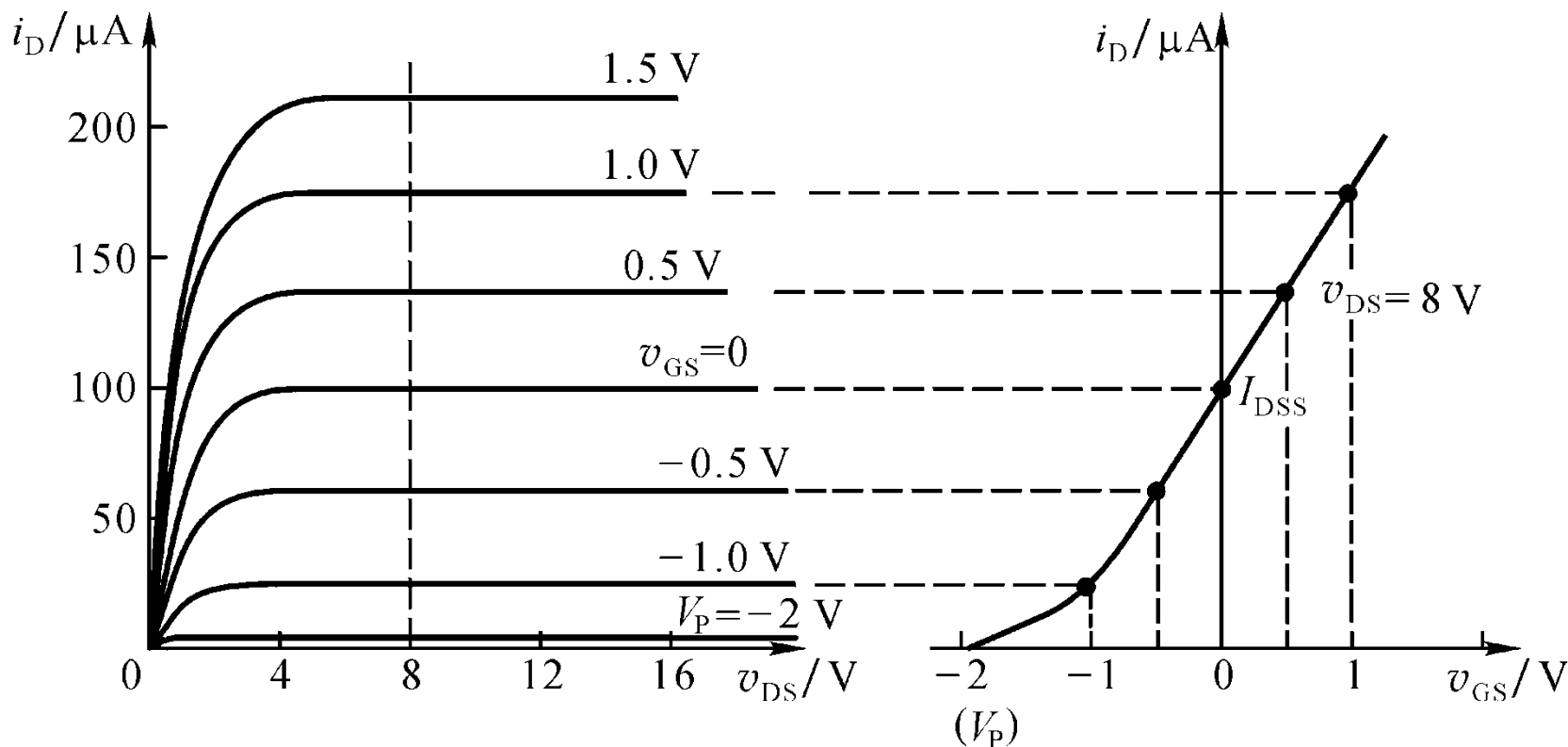


- ✧ 栅极也可以加反偏电压 ($v_{GS} < 0$)，这一点与增强型MOS管不同。
- ✧ 外加负栅压 ($v_{GS} < 0$) 时，沟道变薄，沟道电阻增大， i_D 减小。
- ✧ v_{GS} 负到某一定值 $V_{GS(off)}$ (常以 V_P 表示，称为夹断电压)，导电沟道消失，整个沟道被夹断， $i_D \approx 0$ ，管子截止。

耗尽型MOS管的符号



➤ 耗尽型NMOS的伏安特性



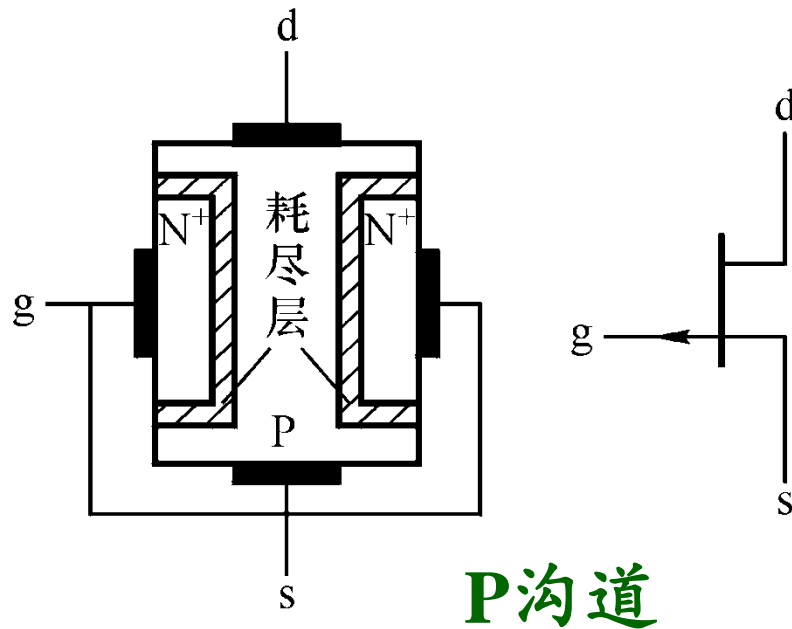
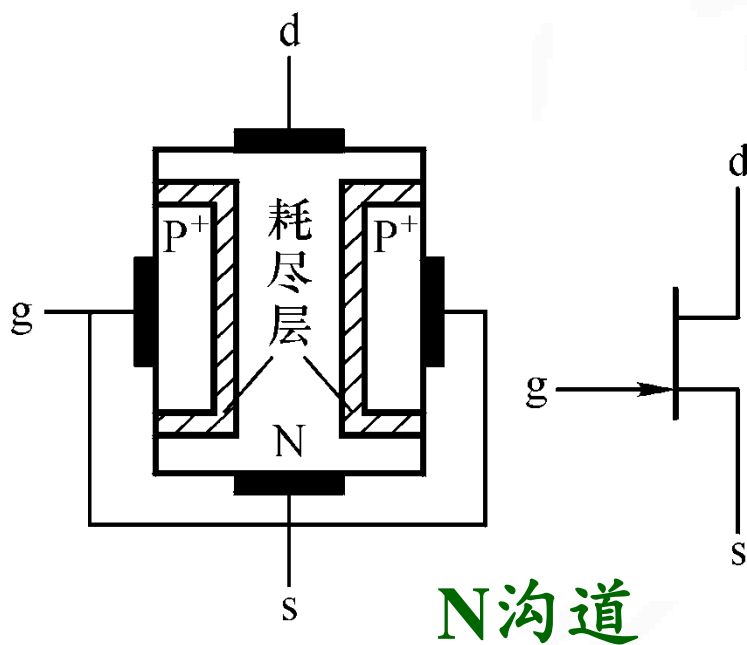
I_{DSS} 为饱和漏极电流，
是 $v_{GS}=0$ 时耗尽型MOS
管的漏极电流。

放大区的电流方程：

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P}\right)^2$$

二、结型场效应管 (JFET)

➤ 结构与符号



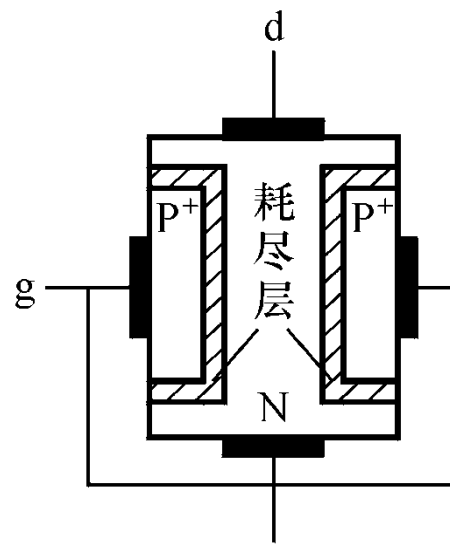
在N区两侧扩散两个P⁺区，形成两个PN结。

两个P⁺区相连，引出g极，**没有衬底B极**。

N区作为N型导电沟道，引出s极和d极。

➤ 工作原理

- ✧ $v_{GS} = 0$ 时，存在N型导电沟道（N型区）。
- ✧ $v_{GS} < 0$ 时，耗尽层增厚，导电沟道变薄。



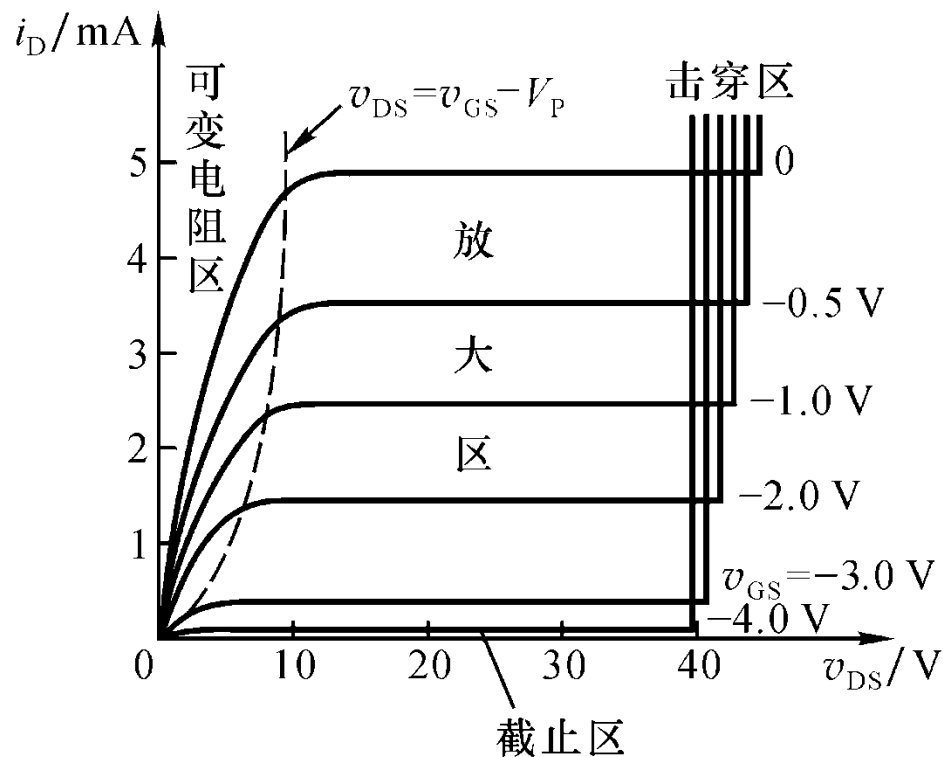
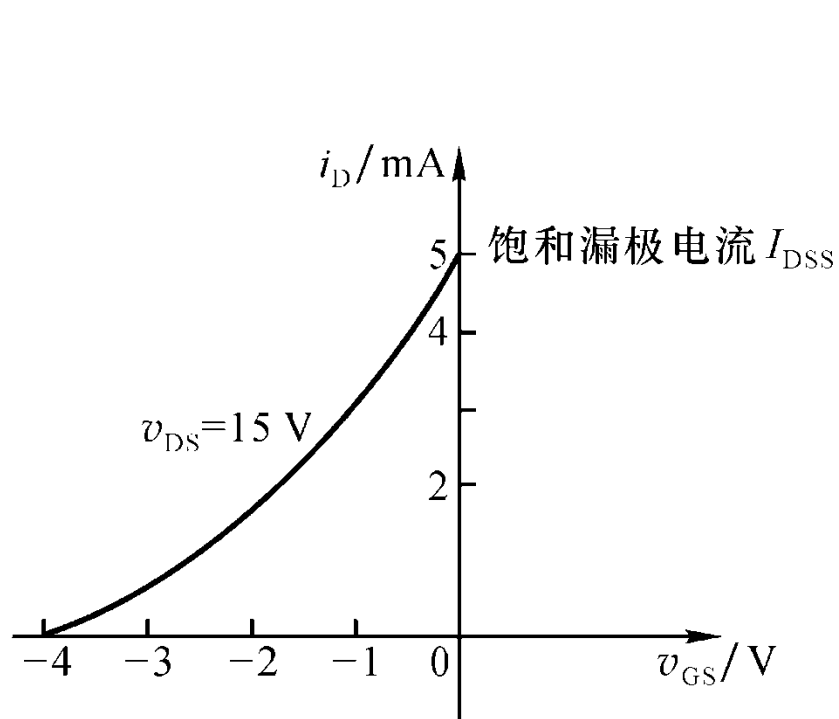
所以属于耗尽型FET，原理和特性与耗尽型MOS管相似。所不同的是JFET正常工作时，**两个PN结必须反偏**，如对N沟道JFET，要求 $v_{GS} \leq 0$ 。

JFET通过 v_{GS} 改变半导体内耗尽层厚度（沟道的截面积）控制 i_D ，称为**体内场效应**器件；

MOSFET主要通过改变衬底表层沟道的厚度来控制 i_D ，称为**表面场效应**器件。



➤ JFET的伏安特性（以NJF为例）



伏安特性曲线和电流方程与耗尽型MOSFET相似。但要求 V_{GS} 不能正偏。



三、场效应管的主要参数

➤ 直流参数

✧ 开启电压 V_T (增强型管)

✧ 夹断电压 V_P (耗尽型管)

✧ 饱和漏极电流 I_{DSS} (耗尽型管)

与 $v_{GS}=0$ 相对应的恒流区漏极电流。

✧ 输入电阻 $R_{GS(DC)}$

因 $i_G=0$ ，所以输入电阻很大。JFET 大于 $10^7\Omega$ ，
MOS管 大于 $10^9\Omega$ 。

➤ 交流参数

✧ 低频跨导(互导) g_m

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \right|_{v_{DS}=\text{const}}$$

g_m 反映了栅压对漏极电流的控制能力，与工作点有关，是转移特性曲线的斜率。 g_m 的单位是mS。

✧ 交流输出电阻 r_{ds}

$$r_{ds} = \left. \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta i_D} \right|_{v_{GS}=\text{const}}$$

r_{ds} 反映了漏-源电压变化量对漏极电流变化量的影响，在恒流区内，是输出特性曲线的切线斜率的倒数。其值一般为若几十kΩ。



➤ 极限参数

✧ 最大漏-源电压 $V_{(BR)DS}$

漏极附近发生雪崩击穿时的 v_{DS} 。

✧ 最大栅-源电压 $V_{(BR)GS}$

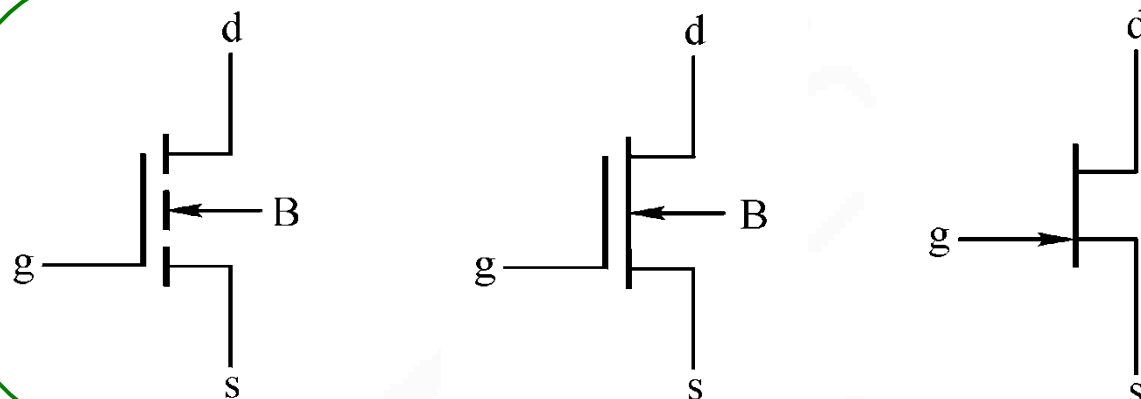
栅极与源极间PN结的反向击穿电压。

✧ 最大耗散功率 P_{DM}

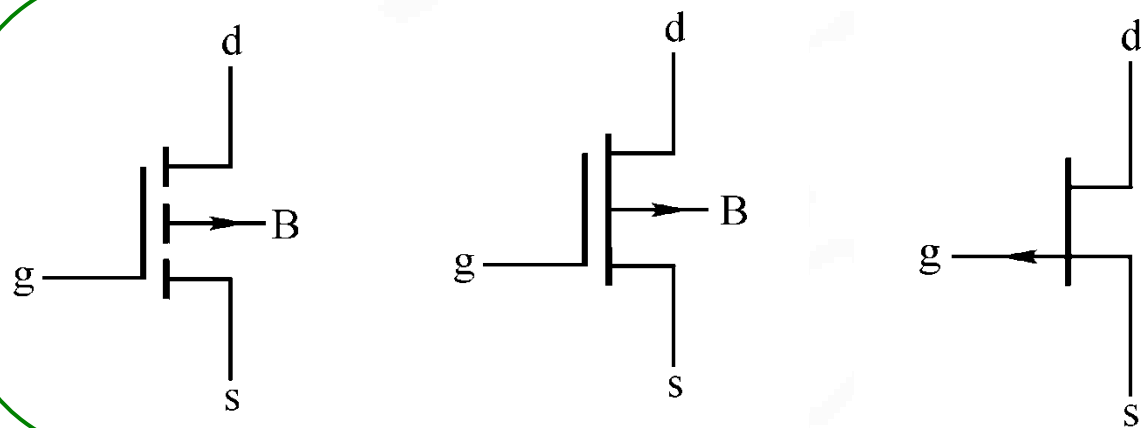
同三极管的 P_{CM} 相似。受管子的最高工作温度及散热条件决定。当超过 P_{DM} 时，管子可能烧坏。

➤ 小结：6种FET对比

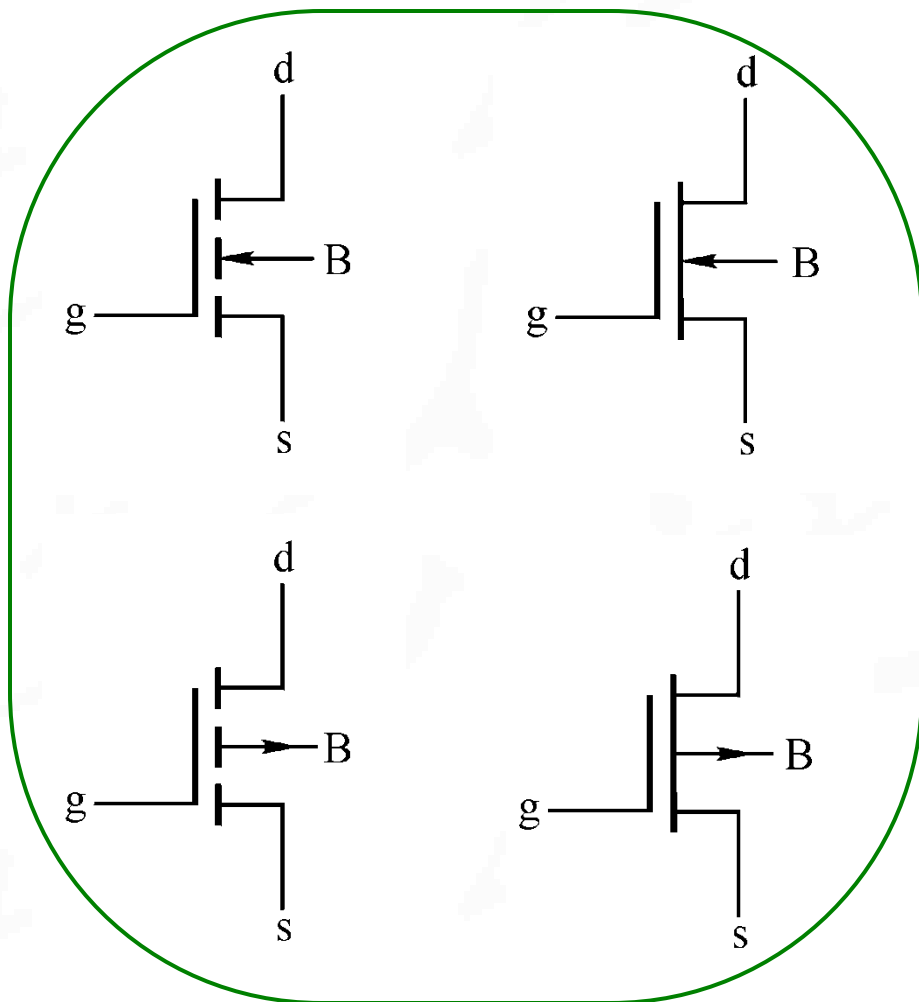




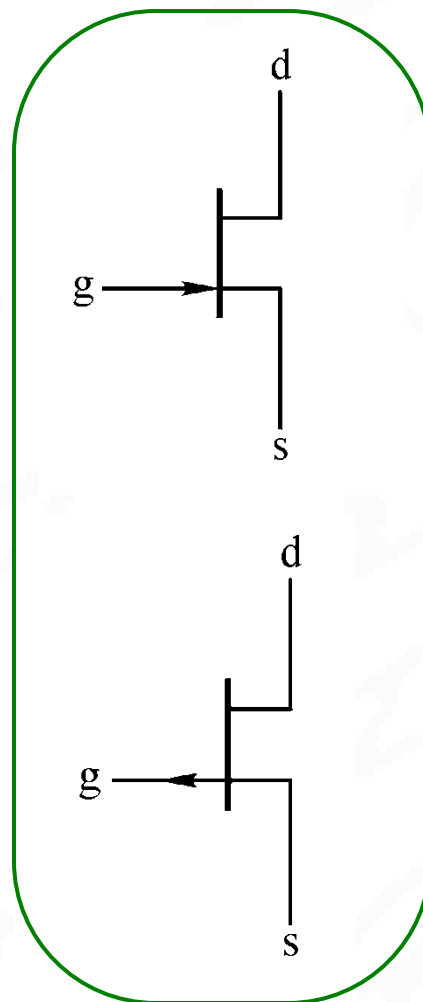
N沟道:
电流从d
流向s



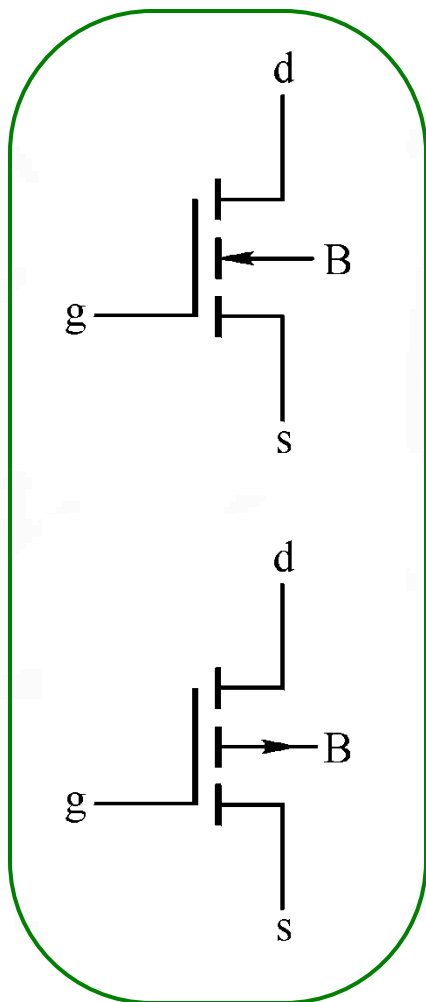
P沟道:
电流从s流
向d



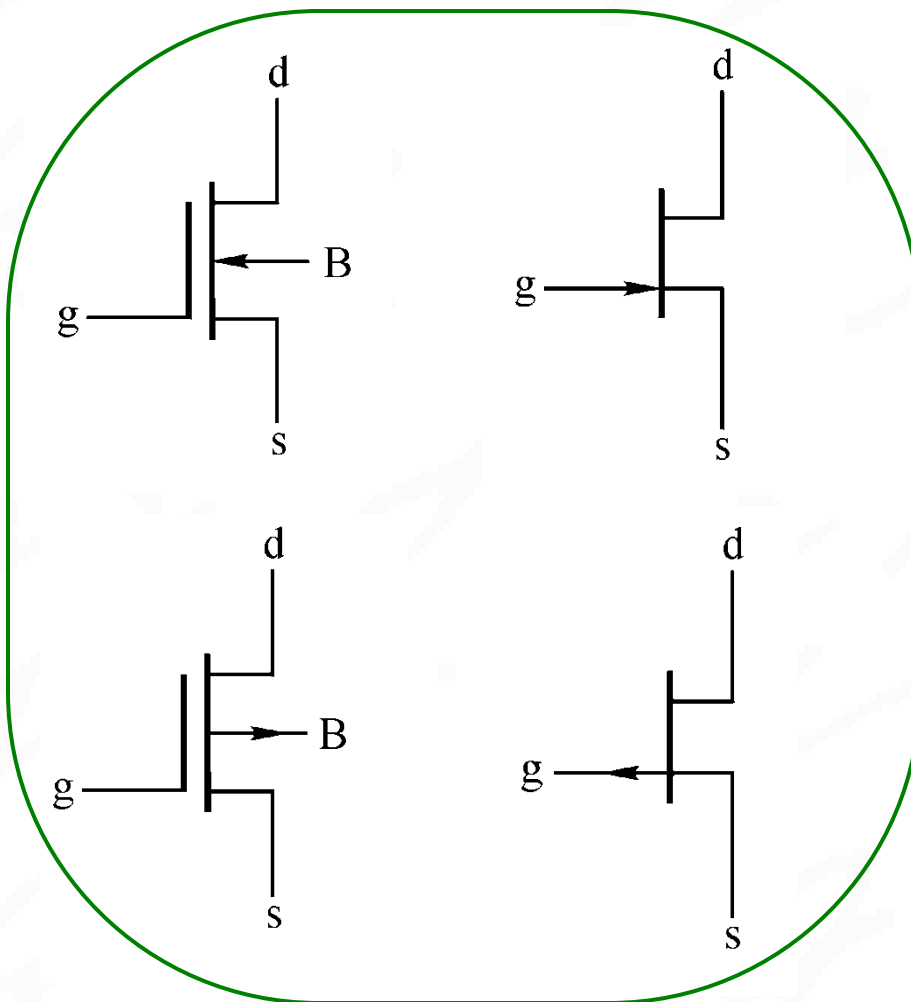
MOS: g极与沟道绝缘



JFET: g极与沟道形成PN结

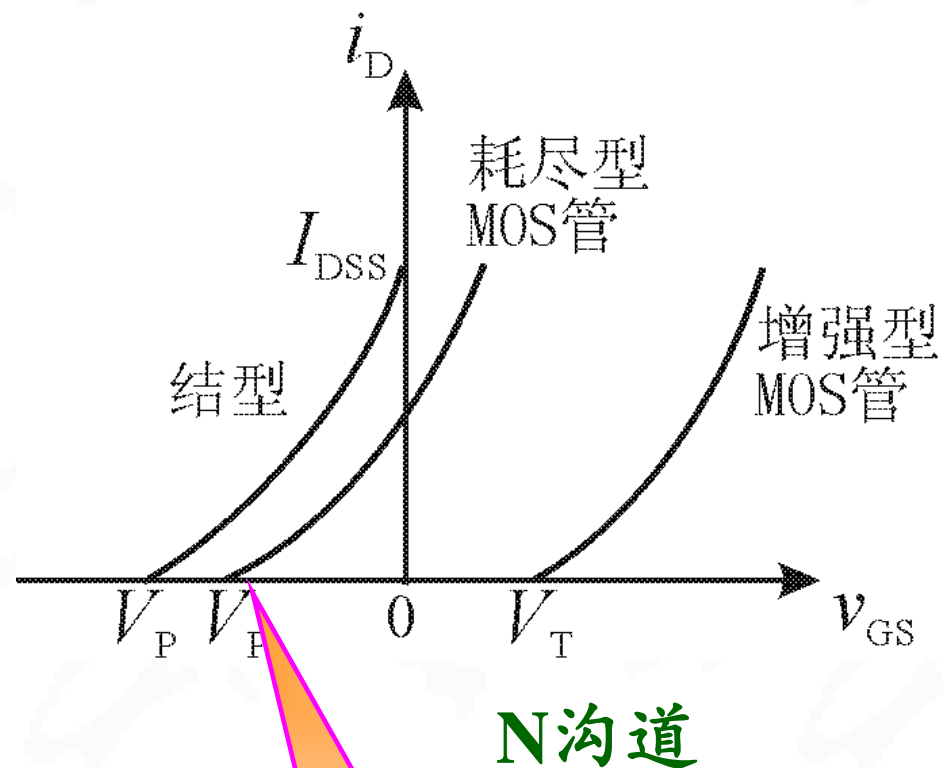


增强型： $v_{GS}=0$ 时，
沟道未形成



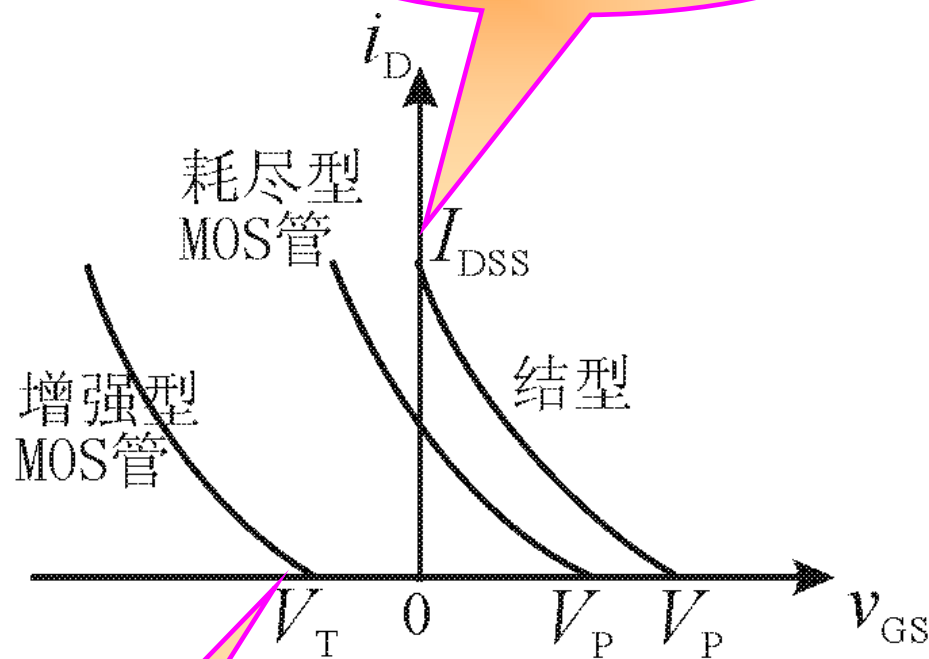
耗尽型： $v_{GS}=0$ 时，
沟道已存在

◇ 场效应管的转移特性



N沟道

夹断电压



P沟道

开启电压

饱和漏极电流



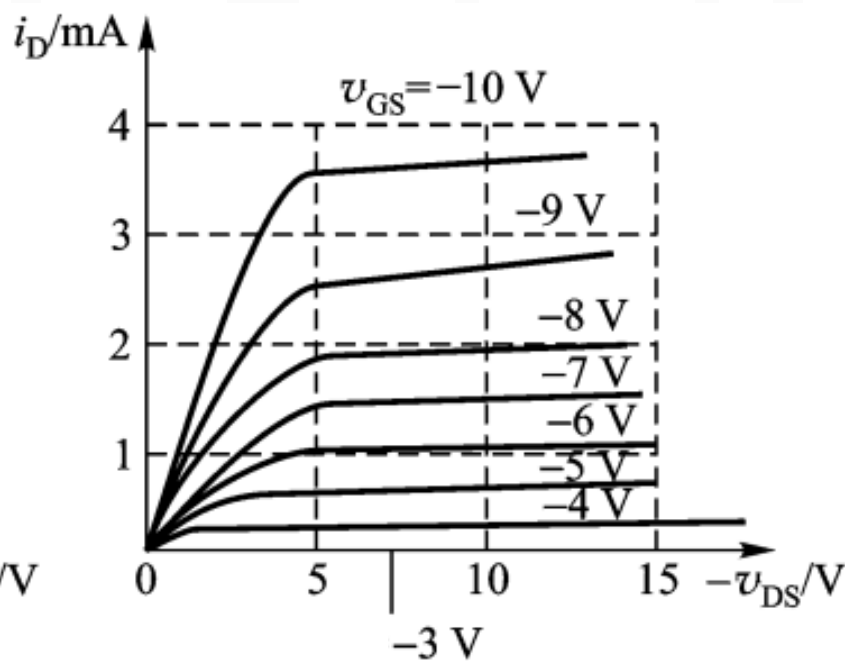
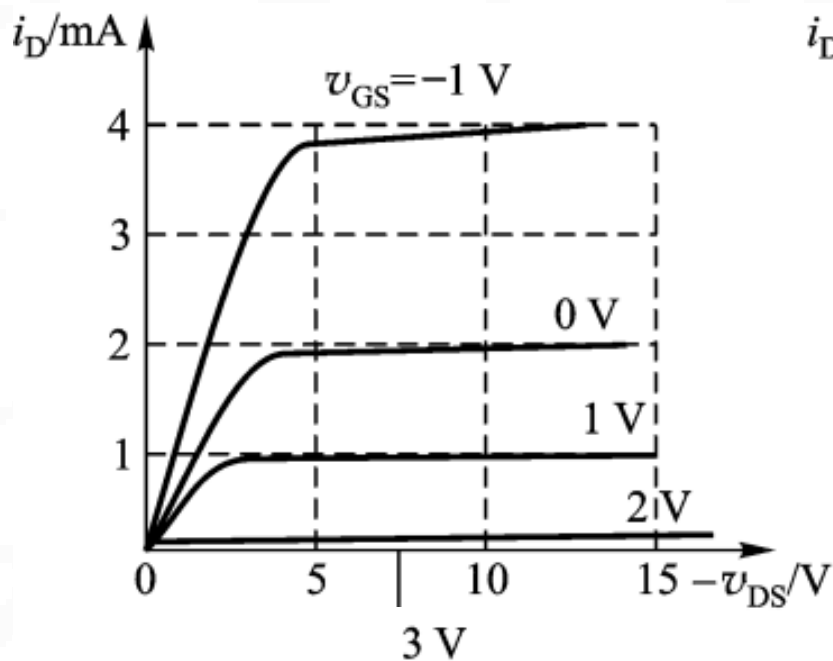
✧ 不同FET类型对偏置电压的要求

场效应管是一种电压控制器件，只需提供栅极偏压，而不需要提供栅极电流（ $i_G=0$ ），并且对电压极性的要求有其自身的特点。

种类 电压	增强型		耗尽型			
	NMOS	PMOS	NMOS	PMOS	N 结型	P 结型
V_{GS}	正	负	负(或正)	正(或负)	负	正
V_{DS}	正	负	正	负	正	负

【例3】

已知FET的输出特性曲线如图，判断其类型，读出 V_P 或 V_T 、 I_{DSS} 或 I_{DO} 。



【解】耗尽型PMOS

$$V_P \approx 2 \text{ V} \quad I_{DSS} \approx 2 \text{ mA}$$

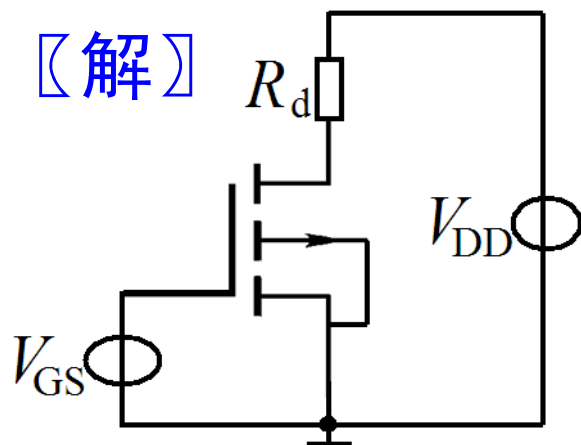
增强型PMOS

$$V_T \approx -3 \text{ V} \quad I_{DO} \approx 1 \text{ mA}$$

【例4】

已知FET电路如图，判断FET类型。若要求FET工作在放大区(恒流区)，标出电源 V_{GS} 、 V_{DD} 的极性。

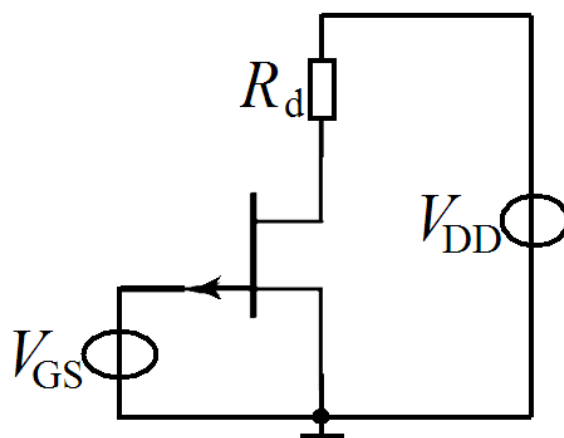
【解】



增强型PMOS

V_{GS} 上负下正

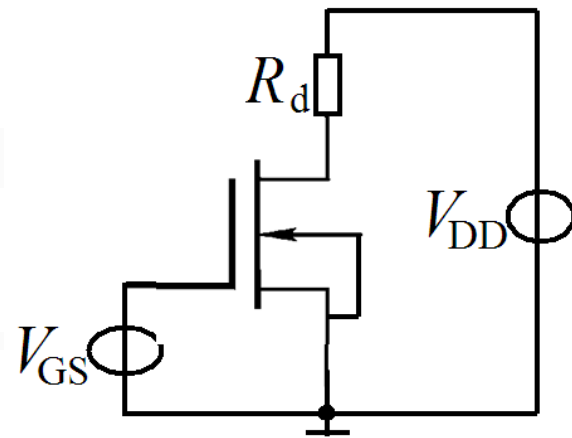
V_{DD} 上负下正



结型PMOS

V_{GS} 上正下负

V_{DD} 上负下正

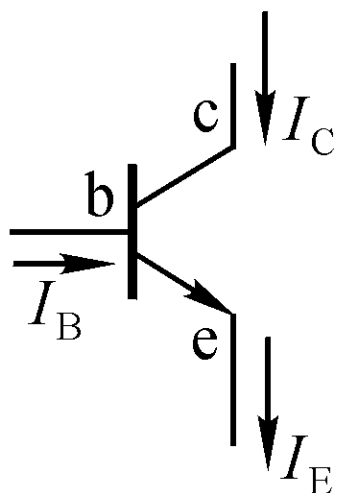


耗尽型NMOS

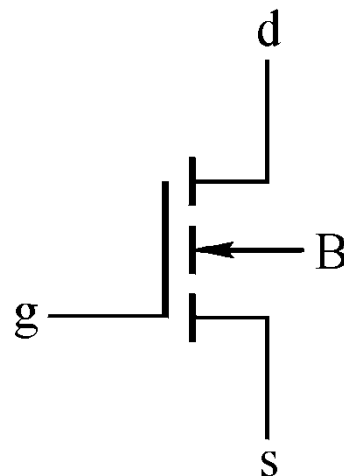
V_{GS} 可正可负

V_{DD} 上正下负

➤ 小结与讨论：三极管与FET之间的区别



三极管



场效应管

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| ✧ 三极管通过 基极电流 控制 集电极电流 | ✧ 场效应管是通过 栅源电压 控制 漏极电流 |
| ✧ 称为 电流控制型 器件 | ✧ 称为 电压控制型 器件 |
| ✧ 多子、少子都参与导电 (称为 双极型晶体管) | ✧ 只有多子参与导电 (称为 单极型晶体管) |



本节重点提示:

- ✧ 三极管和场效应管的内部原理只需了解即可。
- ✧ 掌握三极管的电流关系、伏安特性。
- ✧ 掌握三极管3个工作区的条件和模型；会判断工作状态，会计算电压和电流。
- ✧ 掌握场效应管6种类型的符号。
- ✧ 掌握6种场效应管的输出特性和转移特性；会判断场效应管的类型，会估算 V_P 、 V_T 。
- ✧ 了解三极管和场效应管的主要参数和温度特性。



作业：

题3.13

题3.14

题3.15

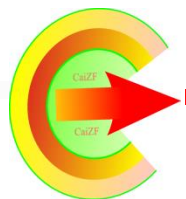
题3.19

题3.21

题3.22



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.5

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2019年